

Contribuciones de la enseñanza fundamentada en modelación para el desarrollo de la capacidad de visualización

Rosária Justi, Poliana F. M. Ferreira¹

Ariadne S. Queiroz²

Paula C. C. Mendonça³

Representaciones y modelación en Ciencias

En ciencias, podemos decir que un “modelo” es una representación parcial de una idea, objeto, evento, proceso o sistema creado con un objetivo específico (Gilbert, Boulter y Elmer, 2000). Los modelos se usan para numerosas funciones, siendo algunas de las más importantes simplificar fenómenos complejos (Rouse y Morris, 1986), favorecer la visualización de entidades abstractas (Bent, 1984; Francoeur, 1997), fundamentar la interpretación de resultados experimentales (Tomasi, 1988), consolidar el desarrollo de explicaciones, fundamentar la proposición de posibles predicciones (Mainzer, 1999), entre otras.

Como representaciones, los modelos son generados a partir de ideas, de construcciones internas en la mente del individuo. Por eso se hace necesario realizar la distinción entre modelos mentales –las representaciones que existen solamente en la mente de cada individuo– y modelos expresos –aquellos que son comunicados a través de cualquier modo de representación: concreto (tridimensional), visual (bidimensional), computacional (pseudo-tridimensional), verbal, matemático, gestual– o combinaciones de esos modos (Gilbert y Boulter, 1995). La expresión de los modelos en algunos de esos modos de representación contribuye significativamente a que entidades inaccesibles o abstractas puedan ser visualizadas.

En química, especialmente, diferentes conceptos e ideas complejas y abstractas requieren, para su comprensión y comunicación, el empleo de modelos concretos, visuales y/o computacionales. Para los científicos, las múltiples representaciones son familiares, y transitan entre ellas de manera natural, pues esto es inherente al propio proceso de investigación científico.

1 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

2 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

3 Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Al estudiar un determinado fenómeno, un químico (como los demás científicos) parte, en general, de representaciones del fenómeno en el nivel macroscópico (producidas a partir del fenómeno en sí, que puede ser visto y manipulado). El proceso de investigación que se lleva a cabo involucra (i) la construcción de modelos para explicar las observaciones hechas y apoyar explicaciones en el nivel sub-microscópico (suministrando explicaciones sobre lo que ocurre en el sistema en términos de átomos, moléculas u otras partículas) y (ii) la representación del fenómeno en el nivel simbólico (el cual hace uso de códigos de representación adecuados). Así, el trabajo del químico involucra, de forma inherente, los tres niveles de representación: macroscópico, sub-microscópico y simbólico.

Considerando lo expuesto anteriormente, la ciencia puede ser definida como un proceso dinámico de construcción de modelos con diferentes capacidades de predicción. Tal proceso –que denominamos modelación– es idiosincrático de la función, principalmente de la influencia en la creatividad de quien lo realiza y de las particularidades de la entidad modelada. Sin embargo, analizando lo que los filósofos de la ciencia y educadores dicen sobre cómo el conocimiento científico se desarrolla (Lawson, 2000; Nersessian, 1992; Vosniadou, 1999), así como el trabajo de científicos que elaboraron conocimientos significativos, es posible deducir algunos elementos que, organizados, producen una representación –denominada “Modelo de Modelación” (figura 1)– que posibilita una visión general sobre cómo los científicos efectúan tal proceso.

Como se enfatizó anteriormente, este diagrama solo presenta una visión general del proceso de producción del conocimiento científico, es decir, no es un algoritmo a ser seguido rígidamente para producir conocimiento. Asumiendo que la producción del conocimiento es un proceso dinámico, las etapas presentadas en el diagrama no siguen, necesariamente, una secuencia lineal, y como queda demostrado en la figura, tampoco unidireccional.

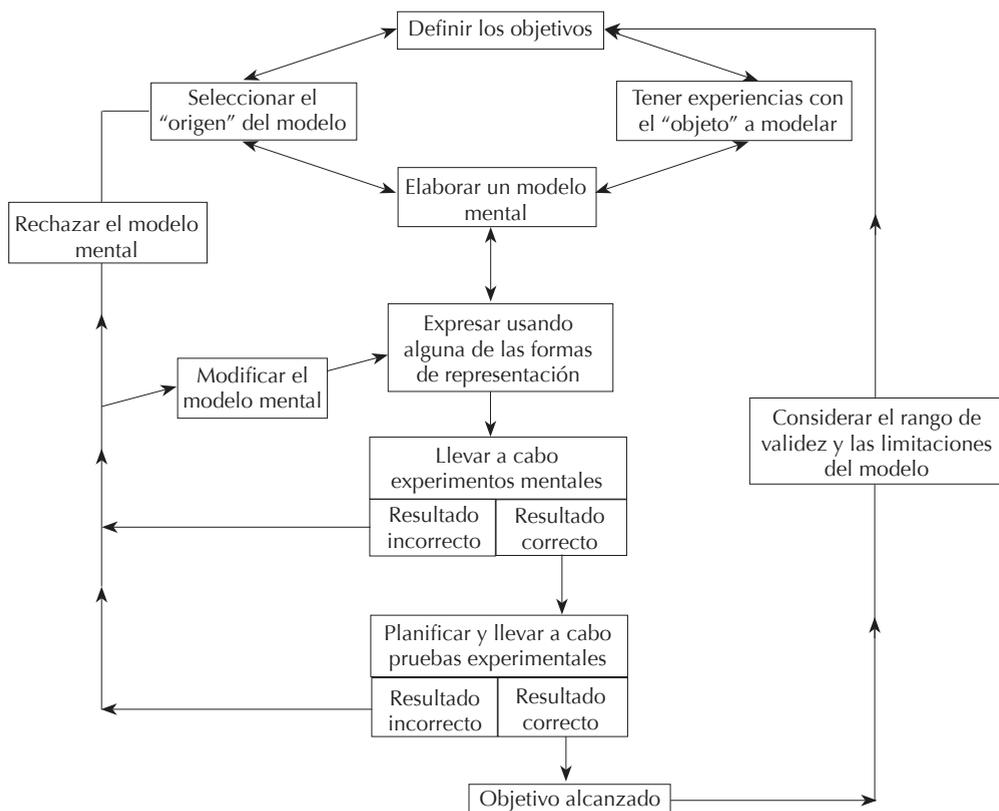


Figura 1. Diagrama de Modelo de Modelación (Justi y Gilbert, 2002, p. 371).

Analizando el diagrama se percibe que, inicialmente, es necesario definir los objetivos para los cuales el modelo será construido. Posteriormente, la persona que va a realizar la modelación debe tener alguna experiencia con el fenómeno a ser modelado (blanco) a través de observaciones o de la adquisición de informaciones presentes en su propia estructura cognitiva o por fuentes externas. A partir de (i) la obtención y organización de experiencias relevantes, (ii) la selección de un origen adecuado (por ejemplo, una analogía) y (iii) la creatividad y razonamiento individual, se puede elaborar un modelo mental inicial. Después, la siguiente decisión a tomar está relacionada con el modo de representación del modelo mental.

Después de socializar el modelo, el siguiente paso es ponerlo a prueba. Esta etapa de pruebas puede suceder a través de experimentos mentales, es decir, de procesos de razonamiento basados en “resultados” de experimentos orientados a la construcción de conocimiento (Reiner y Gilbert, 2000) y/o de experimentos empíricos (caracterizados por actividades prácticas,

seguidas de la recolección y análisis de datos y por la evaluación de los resultados producidos en relación a las predicciones derivadas del modelo). Esta etapa puede ser caracterizada por la ocurrencia sucesiva de estos dos tipos de pruebas o por la utilización de un único tipo. Eso va a depender, entre otros factores, del tema del modelo, de los recursos disponibles y de los conocimientos previos del individuo o grupo de individuos que conduce el proceso. En caso de que las predicciones elaboradas a partir del modelo inicial no sean compatibles con los resultados obtenidos en las pruebas, se hace necesario modificar el modelo, volviendo a las etapas anteriores del ciclo, o proponer uno nuevo, retomando la etapa inicial del proceso. Por otro lado, si el modelo expuesto tiene éxito en la fase de prueba, este satisface los propósitos establecidos inicialmente. Después de la obtención de un modelo bien estructurado, este deberá ser presentado a otras personas, quienes reconocerán (o no) su validez, identificando lo que el modelo es capaz de explicar y sus posibles limitaciones.

Representaciones y modelación en la enseñanza de la química

Actualmente, en todo el mundo se viene defendiendo la necesidad de que la enseñanza de ciencias sea más auténtica, es decir, que se encuentre más próxima a la manera como la ciencia es construida (Gilbert, 2004), que favorezca el desarrollo de un conocimiento, que lejos de la memorización de hechos, ecuaciones y procedimientos, ayude al alumno a comprender mejor el mundo y su entorno, favoreciendo la búsqueda e interpretación de informaciones diversas y fomentando en él una postura crítica en su medio. Considerando lo expuesto anteriormente, creemos que una de las maneras más auténticas de contribuir a una enseñanza de ciencias es fundamentándola en actividades de modelación. Esto debido a que la participación de los alumnos en actividades de modelación, les permitirá elaborar sus propios modelos, evaluarlos en relación a otros (incluyendo, cuando se hace necesario, el presentado por el profesor), entender cómo y por qué los modelos químicos fueron y son elaborados. En otras palabras, ellos pueden aprender sobre cómo se produce el conocimiento químico sobre el modo de pensar científicamente. Además de eso, la inmersión en tal proceso puede ayudar a los estudiantes a aprender temáticas centrales y abstractas en ciencias de una manera más participativa. En otras palabras, la construcción de modelos es una actividad poderosa para enganchar a los alumnos en actividades encaminadas a “hacer ciencia”, “pensar sobre ciencias” y desarrollar “pensamiento científico y crítico”.

La enseñanza de la química –una ciencia que es abstracta debido a la imposibilidad de acceso y/u observación directa de sus objetos de estudio–

tiene como uno de sus principales desafíos favorecer la comprensión en torno al supuesto de que una determinada realidad puede ser modelada a través de diferentes modos de representación. Además de esto, los estudiantes deben desarrollar habilidades para transitar entre estos modos de representación y comprender las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos en contextos diferentes –habilidades estas, difíciles de ser desarrolladas (Johnstone, 1982), pues las explicaciones de los fenómenos y procesos están casi siempre en el nivel sub-microscópico– que no pueden ser observados, pero sí descritos y explicados con modelos mentales, muchas veces expresados a través de símbolos. Sin embargo, investigaciones en esta área evidencian, por ejemplo, que los alumnos son capaces de operar mentalmente en los niveles macro y simbólico, pero encuentran dificultades en relacionarlos con las representaciones equivalentes al nivel sub-microscópico; que los expertos son mucho mejores que los principiantes para transformar un modo de representación en otro (Kozma y Russell, 1997); y que estudiantes inexpertos, que no hacen uso de múltiples representaciones, utilizan aquella que les parece más familiar o simplificada (Treagust y Chittleborough, 2001). En este sentido, sugerimos que el uso de modelos en la enseñanza de química puede contribuir a facilitar la visualización, es decir, la formación de imágenes mentales de entidades abstractas y, a partir de eso, la comprensión de la naturaleza, propiedades y comportamiento de las mismas. Tales planteamientos apoyan la idea de que aprender química consiste en encontrar sentido a lo invisible y a lo intocable (Kozma y Russell, 1997). Esto implica que el uso de representaciones en la enseñanza de la química debe ser inherente al proceso de aprendizaje y que las relaciones entre los tres niveles de representación –sub-microscópico, macroscópico y simbólico– son esenciales para el desarrollo del conocimiento de los estudiantes y para que comprendan el proceso de construcción de la ciencia.

De lo anterior surge la necesidad de promover en ellos la construcción y comprensión de representaciones para el desarrollo y entendimiento de modelos. En ese sentido, y tomando como referencia nuestra creencia de que actividades de modelación podrían ayudar a los estudiantes en la elaboración de representaciones, un abordaje de la enseñanza fundamentada en la modelación fue propuesta a partir del referente teórico brevemente presentado anteriormente.

Objetivo

Considerando el potencial que tienen las actividades de modelación para el desarrollo del conocimiento de contenidos específicos, y especialmente de aquellos conocimientos asociados al uso de representaciones en química, este trabajo presenta un análisis de la aplicación de una estrategia

de enseñanza fundamentada en actividades de modelación, enfocado hacia el proceso de representación implicado en la misma. En este análisis se propone evidenciar elementos del proceso de enseñanza que pueden haber contribuido al desarrollo del conocimiento sobre los niveles de representación usados en ciencias (macroscópicas, sub-microscópico y simbólicas), así como la posible contribución del uso de esas representaciones al desarrollo del conocimiento químico.

La estrategia citada anteriormente fue desarrollada en la enseñanza de la temática de enlace iónico, el cual presenta un alto grado de abstracción, y que por ende requiere de la construcción de múltiples y diferentes representaciones que permitan una comprensión amplia del mismo.

Caracterización de la situación de enseñanza

El concepto de “enlace iónico” fue escogido por ser, de acuerdo con la literatura (Coll y Treagust, 2003; Taber, 1994, 1997), uno de los conceptos que presenta mayor grado de dificultad para su aprendizaje, por lo que los estudiantes desarrollan incontables concepciones inadecuadas. Buscando evitar que tales concepciones fueran desarrolladas en la enseñanza de este tema, se diseñaron actividades que tenían por objetivo llevar al alumno a la construcción de modelos con base en sus conocimientos previos y en nuevas informaciones suministradas en el contexto de enseñanza. Creíamos que, de esa manera, podrían evitarse posibles concepciones alternativas y que los alumnos podrían aprender significativamente del tema a través de las oportunidades de construcción de modelos (tanto sobre contenido como sobre una de las maneras a través de las cuales la ciencia es construida).

En la elaboración de la estrategia de enseñanza sobre el enlace iónico, se consideraron como prerequisites el modelo cinético-molecular; el modelo atómico de Bohr y la distribución electrónica en niveles de energía; la utilización de la tabla periódica y las propiedades periódicas como energía de ionización, afinidad electrónica y radio atómico; los electrones de valencia y la Ley de Coulomb. Además de estos contenidos correspondientes a la química, para el buen desempeño de los alumnos era necesario que tuvieran un conocimiento mínimo sobre modelos⁴ y modelación⁵.

4 Se esperaba que tuviesen una noción sobre qué son los modelos (representación parcial de la realidad con una finalidad específica), de sus funciones (visualización, comunicación, síntesis de datos, explicaciones y predicciones), del carácter provisional de los mismos y del hecho de que puede existir más de una representación para un mismo fenómeno.

5 Es importante que el alumno tenga la oportunidad de modelar una entidad no química antes del modelaje de un sistema químico, para que pueda concentrarse en la tarea de modelar y desarrollar habilidades para el modelaje.

El diagrama de “Modelo de Modelación” fue utilizado como referente teórico en el proceso de elaboración de la estrategia para la enseñanza del enlace iónico. Además de esto, se tomaron en consideración datos sobre la energía involucrada en la formación de sustancias iónicas y de diferentes redes cristalinas de los compuestos iónicos. Cada una de las seis actividades que estructuran la estrategia para la enseñanza de la temática de enlace iónico, fue elaborada contemplando el proceso de modelación, sin que las mismas fueran explicitadas a los estudiantes.

En la *Actividad 1*, a partir del experimento de “Quema un pedazo de cinta de magnesio”, los alumnos deberían percibir la relación entre la disminución de la energía y estabilidad en la formación de una sustancia a partir de los átomos aislados. En términos del diagrama “Modelo de Modelación”, esto significa “tener experiencias con el blanco”, en el sentido de desarrollar o de disponer de algunos de los requisitos necesarios para la construcción de modelos de enlace iónico.

En la *Actividad 2*, ellos deberían proponer un modelo para formación de los iones Na^+ y Cl^- a través de los datos de energía de ionización y afinidad electrónica. Las etapas del diagrama contempladas en esta actividad son “Definir los objetivos” (algo hecho por el profesor), “Producir un modelo mental” a través del conocimiento y de la integración de las ideas anteriores y “Expresar el modelo en alguno de los modos de representación”.

El enfoque directo en torno al concepto de enlace iónico se inició en la *Actividad 3*, cuando los alumnos tuvieron que proponer un modelo que evidenciara cómo sería la interacción entre estos iones para la formación del cloruro de sodio. Por tanto, se les invitó a pensar en lo que ocurre en el sistema “sal de cocina disuelta en agua, cuando el agua es evaporada”. La selección de este sistema se debió a que sus iones constituyentes son simples y familiares a los alumnos y porque consideremos que sería más fácil para ellos construir un modelo para el cloruro de sodio, a partir de ejemplificaciones que involucran fenómenos cotidianos. Al justificar el modelo, los estudiantes, más de una vez, tendrían la oportunidad de relacionar fuerzas de atracción y repulsión, energía y estabilidad del sistema. Para la realización de esta actividad, se dispusieron ante los alumnos varios materiales (por ejemplo, bolas de icopor de diferentes tamaños, palillos, plastilina, colores). Además, tenían la posibilidad de pedir materiales adicionales. Esta decisión fue tomada buscando favorecer la creatividad de los alumnos y ayudarlos a expresar sus ideas. En términos del diagrama “Modelo de Modelación”, esto significa “producir un modelo mental” y expresarlo “en algún modo de representación”.

La *Actividad 4* fue elaborada buscando atender dos objetivos principales. El primero, relacionado con la comprensión de la importancia de probar el modelo. Aún sin presentar el diagrama a los alumnos, una de nuestras metas era que ellos percibieran, mediante las acciones realizadas a lo largo del proceso, cuáles son las etapas más importantes de la elaboración de un modelo. El segundo objetivo era probar el modelo para el cloruro de sodio sólido utilizando una propiedad física significativa de las sustancias iónicas (alta temperatura de fusión), pues los conocimientos que de ahí se derivan, podrían ayudar a los estudiantes a percibir la importancia del estudio de los enlaces químicos para entender el comportamiento de los materiales. Así, lo que esperábamos de esta actividad era que los alumnos percibieran la coherencia y el poder explicativo de sus modelos y no que llegaran a un consenso o acuerdo común acerca del modelo para el cloruro de sodio, ni sobre la explicación para la temperatura de fusión.

De acuerdo con la literatura (Coll y Treagust, 2003; Taber, 1994, 1997), era de esperarse que los alumnos construyeran modelos del tipo “molécula de NaCl” y que no pasarían la prueba⁶. Al suministrar más elementos para la reformulación de los modelos de “molécula de NaCl”, la siguiente información fue presentada a los alumnos en la *Actividad 5*: “En el proceso de formación de pares de cloruro de sodio a partir de un mol de iones Na^+ y Cl^- se libera una cantidad de energía igual a 104,5 kcal/mol. Sin embargo, cuando la substancia de cloruro de sodio se forma, se obtiene experimentalmente que la cantidad de energía liberada es de 206 kcal/mol”. Nuestro presupuesto era que estos datos serían esenciales para que los estudiantes pudieran pensar que existe otra forma de organización más estable que la resultante de la simple atracción de un ión Na^+ y un ión Cl^- , o simplemente para confirmar la validez de sus modelos.

Finalmente, en la *Actividad 6* los alumnos deberían probar el modelo propuesto en la *Actividad 5*, usando éste para explicar la elevada temperatura de fusión del cloruro de sodio. Además, ellos deberían argumentar el hecho de que los compuestos iónicos sean duros, quebradizos y que presenten planos de clivaje. En términos del diagrama “Modelo de Modelación”, esta última actividad proporcionó a los estudiantes la oportunidad de conducir “experimentos mentales” y de “considerar los alcances y las limitaciones de un modelo”, observando que los replanteados por los alumnos (en esta o en la actividad anterior) deberían ser aplicados en un nuevo contexto⁷.

6 La temperatura de fusión del cloruro de sodio es de 80°C. Para explicar este valor es necesario un modelo que tenga en consideración una estructura con varios enlaces fuertes, lo cual no se aplica al modelo molecular del NaCl.

7 Para obtener más detalles sobre la estrategia de enseñanza, ver Justi y Mendonça (2007), Mendonça y Justi (2007) y Justi (2007).

En esta última actividad, la profesora discutió las principales características del modelo electrostático para los compuestos iónicos y también el tipo de estructura de otras sustancias iónicas.

La investigadora 4 (PCCM) era profesora del curso con el cual se desarrolló la presente investigación. Por tanto, era quien tenía el conocimiento de los contenidos abordados durante este año lectivo. El aula en la que se aplicó la estrategia de enseñanza fue el segundo año de secundaria de una escuela pública federal, localizada en una ciudad brasileña, constituida por 32 estudiantes, quienes siempre trabajaron en grupos de 5 a 6 integrantes fijos. La mayoría de ellos no había estudiado enlace químico en esta escuela⁸.

Recolección de datos

Después de la aprobación del proyecto por el Comité de Ética en Investigación de la universidad y de la firma que otorga el Consentimiento Libre e Informado por parte de los estudiantes y de sus responsables (padre o tutores), las clases fueron filmadas por otra investigadora (PFMF), quien orientaba las discusiones entre alumnos y entre ellos y la profesora. También fueron acopiados todos los resultados escritos, elaborados por los alumnos en cada una de las actividades, además de los apuntes de campo realizados por la profesora y por la otra investigadora, en donde se registraron sucesos importantes de las clases.

Análisis de datos

Los datos recolectados fueron integrados a la elaboración de los estudios de caso para cada uno de los grupos. Estos estudios de caso pretendían caracterizar el proceso de construcción del conocimiento por parte de los alumnos en torno al concepto de enlace iónico. La elección de estudios de caso y su estructuración, se hizo por ser esta una forma de presentar una rica descripción de los acontecimientos, organizándolos en una narrativa cronológica (Cohen, Manion y Morrison, 2000). Esto hizo posible identificar los elementos que contribuyeron para el desarrollo de las ideas de los estudiantes a lo largo del proceso de enseñanza.

El análisis de los estudios de caso fue realizado buscando evidenciar cómo los diferentes niveles de representación fueron usados y relaciona-

8 Algunos alumnos habían estudiado ese tema en la enseñanza fundamental, en el año primero de enseñanza media en otra institución escolar o en el curso preparatorio para el ingreso a esa escuela. Los mismos alumnos reconocerán, en las discusiones con la profesora, que no recordaban lo que habían estudiado antes. Y lo que habían visto sobre el tema, no contribuyó al desarrollo de sus modelos.

dos en la construcción del conocimiento, destacando los momentos en que dicha construcción de representaciones realizada por los estudiantes fue favorecida por el proceso de enseñanza, y cómo estas contribuyeron para el desarrollo del conocimiento del contenido objeto de trabajo.

Las etapas de los estudios de caso que apoyaron el análisis propuesto en el presente trabajo, fueron aquellas en las que los alumnos construyeron y presentaron sus modelos para el grupo, especialmente en los contextos de las actividades 3, 4, 5 y 6.

Presentación y discusión de algunas de las representaciones elaboradas por los estudiantes⁹

El análisis de los estudios de caso, mostró qué elementos se involucraron en el proceso de construcción de las representaciones y permitió identificar las contribuciones específicas que tales representaciones tuvieron en el aprendizaje de los alumnos. Algunos ejemplos de ambos aspectos serán presentados y discutidos a continuación.

El primer modelo construido por los estudiantes consistió en la representación del cloruro de sodio sólido, que fue realizado a partir de la fórmula NaCl, presentada por la profesora en la *Actividad 3*, y del conocimiento previo de los alumnos sobre los iones que constituían esa substancia, discutido en la *Actividad 2*.

La transposición de la representación simbólica de la fórmula NaCl para modelos concretos, resultó de la elaboración de modelos de “molécula de NaCl” (es decir, un átomo de sodio unido a un átomo de cloro) por la mayoría de los grupos (5 de los 6 grupos lo representaron así). En la construcción de este modelo, los estudiantes representaron varios pares de “NaCl” una vez que, para ellos, quedó claro que el sólido era constituido por la interacción entre “las moléculas de NaCl”, lo que implicó que no se pudiera representar por un único par. En esta representación, ellos buscaron diferenciar el enlace existente entre los iones Na^+ y Cl^- de las interacciones entre los pares de NaCl. Esto quedó explícito en la representación del grupo 6 (figura 2), que evidencia “enlaces” de tamaños diferentes entre las esferas.

9 Los alumnos se identificaron por códigos de tipo A_xC_y , donde x es el número de orden del alumno (asignado aleatoriamente) y t es el número del grupo.

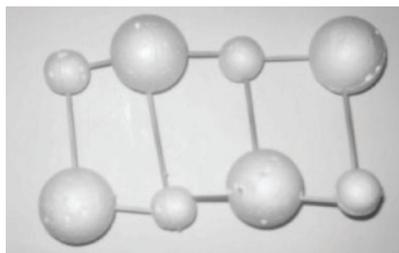
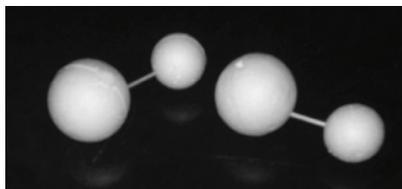


Figura 2: Modelo del grupo 6. Interacciones entre “moléculas de NaCl”.

La representación construida por el grupo 2 fue semejante a la del grupo 6. Pero debido a la dificultad de representar la interacción entre los pares de NaCl, contruidos con bolas de icopor y palos (figura 3A), el grupo optó por usar plastilina para la construcción de la representación (figura 3B).

A



B

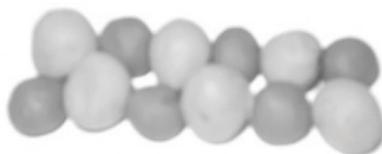


Figura 3. A y B: Modelos del grupo 2 para NaCl.

La representación construida por el grupo 2 fue semejante a aquella del grupo 6. A pesar de haber elaborado la representación mostrando la unión entre varios pares de NaCl (figura 3B), uno de los alumnos del grupo 2, sin convicción de su idea sobre cómo los pares estarían conectados entre sí, los separó y retornó la duda al grupo. En aquel momento, con base en la representación construida, la profesora inició un cuestionamiento sobre esta representación:

Profesora: ¿esas serían varias moléculas¹⁰?

A1G2: sí, de NaCl.

Profesora: ¿y aquello que usted había juntado?...

A2G2: podría ser un sólido.

Profesora: °sí!

A1G2: pero ahí parece que la fuerza de unión es igual a la interacción.

10 El término *moléculas* fue introducido en la discusión por los mismos alumnos, sin que, al principio, la profesora los corrigiese.

Este diálogo muestra cómo los códigos usados en el proceso de representación llevaron a un cuestionamiento fundamental sobre el enlace, esto es, cómo el análisis de la representación apuntó hacia el cuestionamiento de la magnitud de las fuerzas de enlace presentes en el compuesto iónico.

Luego de este diálogo, la profesora le recordó al grupo la Ley de Coulomb, a partir de la cual los estudiantes analizaron el modelo del compuesto construido por ellos (figura 3B), como resultado de la interacción entre cargas.

A pesar de que aún se mantuviera la idea de que los enlaces entre los iones Na^+ y Cl^- son más fuertes que las uniones entre los pares de iones NaCl , el grupo construyó una nueva representación (figura 4) que, con base en la interpretación de la Ley de Coulomb, presentaba la diferencia en la intensidad de los enlaces a través del aumento de la distancia entre los pares. Es decir, si la unión (dentro del par NaCl) es más fuerte que la interacción (entre pares de NaCl), la mayor distancia de la interacción explica la menor fuerza de esta, a partir de la Ley de Coulomb.

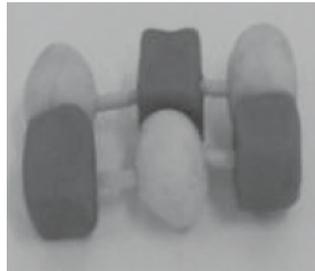


Figura 4: Modelo construido por el grupo 2, demostrando la diferencia de intensidades de los enlaces y de las interacciones a través de las longitudes de enlace.

La construcción de este modelo evidenció la transferencia realizada por los alumnos de una representación simbólica (la ecuación que expresa la Ley de Coulomb*)¹¹ a una representación en el nivel sub-micro, en donde el análisis de la primera llevó a las modificaciones en la segunda, haciendo la representación compatible con el modelo que ellos habían construido para el enlace.

$$* F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

11 F representa las interacciones electrostáticas entre las cargas, que son consideradas como puntiformes; K es una constante, que depende del medio, Q_1 y Q_2 se refieren a las cargas de las partículas y r representa la distancia entre las mismas.

El grupo 1, inicialmente representó varios pares NaCl sin que hubiese enlace entre estos, y después de la observación del modelo del grupo 3 (figura 3B) y de las discusiones de dicho grupo con la profesora, propuso un enlace para los pares iónicos en cadena (figura 5). Al cuestionarlos la profesora respecto al porqué de esta representación, los alumnos afirmaron haber modificado su modelo a partir de las ideas del otro grupo. Esto evidencia la importancia de la socialización de ideas entre los grupos para la reelaboración de sus representaciones.

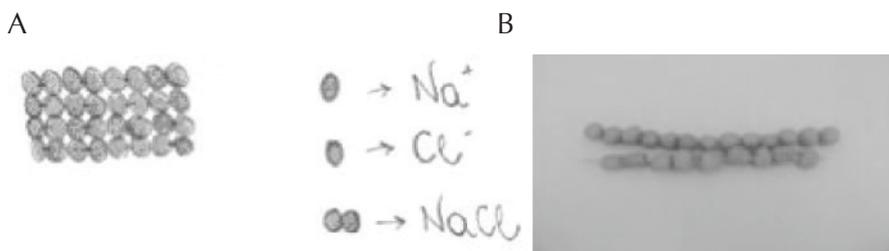


Figura 5. Modelos representados por el grupo 1: A. Diseño; y B. Concreto.

Para realizar las representaciones del compuesto NaCl, todos los grupos hicieron uso de plastilina y palillos. El uso de la plastilina fue justificado por los grupos, dadas las posibilidades que ofrece para diferenciar los “átomos Na y Cl” (sic), representando la diferencia de sus rayos iónicos, y también por la facilidad para unir las bolitas con o sin el uso de palillos (dependiendo de la representación construida). Sobre los materiales y las formas de representación utilizadas, algunos estudiantes explicitaron el conocimiento sobre las limitaciones de los medios de representación, y además, sobre la diferencia entre la representación construida, el modelo mental que habían elaborado para el sistema y la realidad:

“En verdad no existe un palito que una los átomos.”

“Los átomos no son eso (bolitas). Eso es solo una representación.”

Los conocimientos previos de los estudiantes fueron elementos que suministraron apoyos fundamentales al desarrollo de ciertas ideas, como se observó en el grupo 5, quienes a partir de la idea de que una solución acuosa de cloruro de sodio es electrolítica, concluyeron que en ella existen iones Na⁺ y Cl⁻, abandonando así la idea de la existencia de moléculas de “NaCl”. Este grupo anotó, además, que el modelo de “molécula de NaCl”, a pesar de no representar el NaCl sólido (pues no señala las varias uniones existentes entre los iones), representa la proporción 1:1 del NaCl. De esta manera, el grupo reconoció la diferencia entre la representación simbólica (fórmula “NaCl”) y la estructura del compuesto (representada en dos o tres dimensiones).

Sin embargo, en la construcción del primer modelo para el NaCl sólido, el grupo 4 fue el único que construyó la representación de éste en red¹², sin presentar la idea de “molécula de NaCl”. Este grupo usó representaciones diferenciadas para el nivel sub-microscópico al expresar el modelo de forma concreta (con plastilina y palillos) y bidimensional (diseñado) (figura 6).

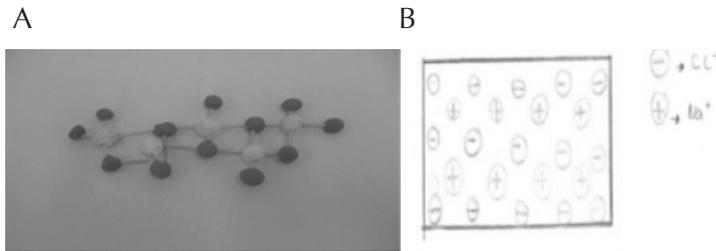


Figura 6. Modelos construidos por el grupo 4: A. Concreto; y B. Diseño.

A pesar de que en el modelo concreto la representación de los enlaces está hecha con palillos, en el dibujo estos no se representan (solo se dejó explícita la idea de atracción entre las cargas de los iones constituyentes), lo cual parece indicar que los estudiantes comprendían que los enlaces no son entidades físicas. Esto puso en evidencia una buena comprensión sobre la Ley de Coulomb (anteriormente estudiada en Física), lo que permitió que esta fuera aplicada en el nuevo contexto.

La mayoría de los alumnos desarrollaron sus ideas sobre enlace iónico como una unión en red, sin la formación de “moléculas de NaCl”, a partir de dos elementos esenciales: (i) la introducción de datos sobre las energías involucradas en la formación de pares iónicos y red iónica y (ii) la interpretación de la Ley de Coulomb y aplicación de la misma en el modelo. La profesora discutió con los grupos la relación de estos elementos con sus modelos, usando los modelos concretos construidos por ellos para poder explorar sus ideas. Lo anterior puede ser observado en la discusión con el grupo 1, cuando la profesora usó su propio modelo concreto del grupo para cuestionarlos acerca de lo que ellos pensaban en torno al proceso de fusión (si ocurre cuando se da la separación de iones o de moléculas). Para esto, la profesora manipuló el modelo construido por los estudiantes (figura 5B), simulando las dos posibilidades: moléculas separadas o iones separados. Esto proporcionó una oportunidad para que el grupo usara su modelo en la interpretación de un dato empírico.

12 El modelo en red es más próximo al modelo científico, pues reconoce la existencia de múltiples atracciones.

La evolución de las ideas de los estudiantes en torno a la formación de uniones en red, fue acompañada por la construcción de representaciones que explicitaron las diversas uniones existentes entre los iones del compuesto.

El grupo 1, al analizar la representación para el compuesto iónico diseñada en el cuadro por la profesora (semejante al dibujo de la figura 5B), llamó la atención por la limitación de la representación, justificando que el modelo debería representar una estructura tridimensional, mostrando mayor número de uniones en el compuesto (lo que explicaría la elevada temperatura de fusión de este). En este momento, fue posible percibir que estos estudiantes relacionaron un dato empírico (temperatura de fusión) con la representación sub-microscópica de la estructura, demostrando la habilidad de transitar entre el fenómeno y el modelo, probando y aplicando este último en la elaboración de explicaciones.

Durante la discusión final en el proceso de enseñanza, la profesora presentó diferentes formas de representación en los niveles macroscópico y sub-microscópico, a través del uso de fotos que representaban diversos compuestos iónicos (como la calcita, CaCO_3 , hematita, Fe_2O_3 , entre otros) y modelos bidimensionales (dibujos) que representaban las estructuras de aquellos compuestos, explicitando la geometría de sus retículos cristalinos. Representaciones diferenciadas fueron presentadas para un mismo compuesto, utilizando dibujos de modelos “esferas y bastones” y de modelos de estructura compacta. Estas representaciones fueron relacionadas entre sí y, a continuación, los estudiantes fueron incentivados a inferir la estructura de otros compuestos iónicos, teniendo en cuenta sus radios iónicos y, con eso, la distribución de iones en el retículo. A partir de esto, los estudiantes se mostraron capaces de hacer previsiones sobre la geometría de otros compuestos, conforme expresó un alumno en relación a la previsión sobre la estructura del CsCl (elaborada en comparación a la del NaCl):

“La distancia entre los iones puede ser diferente, pero la estructura puede ser igual”¹³.

Las propiedades de los compuestos iónicos (como dureza y fragilidad) fueron relacionadas con el modelo de enlace propuesto, e interpretadas a partir del mismo. Figuras y fotos de compuestos iónicos fueron usadas en la discusión sobre planos de crecimiento de los cristales y de clivaje, permitiendo establecer relaciones entre representaciones macroscópicas y sub-microscópicas. Los alumnos también observaron y manipularon modelos

13 Según el alumno, el CsCl también podría organizarse en un retículo cúbico presentando, sin embargo, una mayor distancia entre los iones Cs^+ y Cl^- , en comparación con la distancia entre Na^+ y Cl^- , debido a la diferencia de radios iónicos de Cs^+ y Na^+ .

tridimensionales para varios compuestos iónicos (como carbonato de calcio, fluoruro de calcio, sulfuro de zinc, cloruro de cesio) proporcionados por la profesora. Durante la observación de los modelos, los estudiantes mostraron una buena comprensión de los retículos analizados, identificando la proporción entre los iones en cada estructura representada y las diversas uniones realizadas en el retículo. Explicitaron la contribución que hace el uso de diferentes tipos de representación y, en especial, de la construcción de estas representaciones para la comprensión de la estructura de los compuestos:

“Construir y usar los modelos permite observar por qué la proporción es uno a uno, si se tiene una gran cantidad de uniones.”

Este mismo alumno afirmó que creía que no habría entendido la proporción entre los iones en la estructura de un retículo, si únicamente hubiera visto el dibujo de la estructura en el libro:

“...yo ya había visto estos modelos en el libro del año pasado, pero de esta forma se puede entender que este modelo está correlacionado con ese, con ese y con ese (refiriéndose a la unión existente entre un ión con varios otros iones dentro del retículo).”

Así, los mismos estudiantes reconocieron que construir, usar y manipular los modelos en las diferentes posibilidades de representación, se constituye en elementos capaces de contribuir, de forma significativa, al desarrollo y reconstrucción de sus conocimientos.

Consideraciones finales

El análisis de la aplicación de la estrategia de enseñanza mostró su gran potencial para la construcción del conocimiento en torno a la temática de enlace iónico, observándose que el desarrollo gradual de tal conocimiento estuvo asociado al aumento de la capacidad de los estudiantes para integrar múltiples representaciones (construidas por ellos o dispuestas por la estrategia de enseñanza o por la propia profesora). Tal análisis evidenció que los principales elementos del proceso de enseñanza fundamentada en modelación que contribuyeron para esto fueron: (i) la presentación de datos empíricos que desencadenaron el pensamiento de los alumnos en varias actividades; (ii) la expresión de los modelos de los alumnos en por lo menos tres formas diferentes (concreta, dibujo y verbal); (iii) los cuestionamientos de la profesora; (iv) las oportunidades que los alumnos tuvieron para probar sus propios modelos; (v) las oportunidades que los alumnos tuvieron para presentar sus modelos al grupo y las discusiones que esto generaba. Por el potencial para asociar la observación de fenómenos y/o

el análisis de conceptos e ideas para la construcción de modelos, tales elementos del proceso de enseñanza brindaron a los alumnos oportunidades de (a) transitar entre diferentes niveles y formas de representación, lo que contribuyó para que ellos las comprendieran; (b) desarrollar sus habilidades para pensar en torno a algo, comunicar ideas complejas y entender que existen diferencias entre un determinado modelo y las características de la entidad que él está intentando representar, y que por ende, no hay un único modelo “correcto”; y (c) que participaran en la construcción de representaciones personales y en la discusión de la coherencia de dichas representaciones con las explicaciones científicamente aceptadas.

Además de esto, las actividades realizadas contribuyeron para que los estudiantes desarrollaran y comprobaran las capacidades asociadas al proceso de representación, que son fundamentales en el aprendizaje en química (Justi, Ferreira y Gilbert, en prensa):

Construir representaciones para determinados propósitos

Las representaciones construidas por los estudiantes, que implican la elaboración de códigos y el uso de formas de representación no estudiadas anteriormente, posibilitó el análisis de sus propios modelos mentales, desarrollando la habilidad de expresión y adecuación de sus ideas a los medios y/o formas de representación, siempre buscando atender a las necesidades y demandas de las actividades propuestas

Descifrar y comprender los códigos de representaciones

La construcción de representaciones para sus modelos, independientemente del nivel en que ocurría, requirió por parte de los estudiantes de la elaboración y el uso de códigos que expresaran sus ideas. Esto hizo que tuvieran contacto con las limitaciones inherentes al proceso de representación y, con esto, reconocieran la diferencia entre esta y el modelo original, o aún, entre esta y la propia realidad.

Transformar una forma de representación en otra

La transición entre los niveles de representación (sub-microscópico, macroscópica y simbólica) fue necesaria y evidente, tanto en la construcción como en la comunicación de los conceptos científicos y modelos, cuando los estudiantes usaron informaciones y modelos previos, expuestos bajo diferentes tipos de representación (gráfico, tabla, modelos bidimensionales), para el desarrollo de sus ideas y construcción de dichos modelos.

El uso de representaciones para hacer predicciones

Muchas veces, la manipulación de los modelos concretos ayudó a los alumnos a estructurar sus ideas y a elaborar hipótesis que colaboraron con la discusión en torno a la validez de sus modelos.

La profesora tuvo un papel fundamental en este aprendizaje sobre las representaciones, en la medida en que, a lo largo del proceso, hizo referencia a las estructuras de los compuestos a partir de sus fórmulas, evidenciando las diferencias entre los tipos de representación; relacionó la estructura sub-microscópica con las propiedades macroscópicas (plano de clivaje y crecimiento de cristales) y, principalmente, cuestionó a los alumnos en relación a los códigos de representación que ellos utilizaron en cada uno de sus modelos y el significado de sus representaciones.

La consideración de nuestras conclusiones por parte de profesores de ciencias, particularmente de química, pueden sustentar modificaciones en contextos de enseñanza que tengan como objetivo brindar a los estudiantes oportunidades para elaborar sus propias representaciones para diferentes entidades o procesos, analizar la coherencia y aplicabilidad de las mismas, entender el significado de múltiples representaciones y cómo transformar unas en las otras (como ocurrió en el proceso de enseñanza fundamentada en la modelación, analizado en este trabajo). Creemos que eso podrá resultar en el desarrollo del conocimiento de los alumnos sobre el tema en estudio y sobre los procesos de construcción de conocimiento en ciencias.

Agradecimientos

Las autoras 1 (RJ), 2 (PFMF) y 4 (PCCM) agradecen al CNPq por sus bolsas de investigación, doctorado y maestría, respectivamente.

Referencias bibliográficas

Bent, H. A. (1984). Uses (and abuses) of models in teaching chemistry. En: *Journal of Chemical Education*, 61 (9), 774-777.

Cohen, L.; Manion, L. y Morrison, K. (2000). *Research Methods in Education* (5°. Ed.). London y New York: Rutledge Falmer.

Coll, R. K. y Treagust, D. F. (2003). Investigation of secondary school, undergraduate and graduate learners' mental models of ionic bond. En: *Journal of Research in Science Teaching* (40), 464-486.

- Francoeur, E. (1997). The forgotten tool: The design and use of molecular models. En: *Social Studies of Science* (27), 7-40.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and Modeling: Routes to a more authentic science education. En: *International Journal of Science and Mathematics Education* (2), 115-130.
- Gilbert, J. K. y Boulter, C. J. (1995). *Stretching models too far*. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Francisco.
- Gilbert, J. K.; Boulter, C. J. y Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. En: J. K. Gilbert y C. J. Boulter (Eds.). *Developing Models in Science Education* (pp. 3-17). Dordrecht: Kluwer.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and microchemistry. En: *The School Science Review*, 64 (227), 377-379.
- Justi, R. y Gilbert, J. K. (2002). Modeling, teachers' views on the nature of modeling, implications for the education of modelers. En: *International Journal of Science Education*, 24 (4), 369-387.
- Justi, R. (2007). Modelagem-Uma abordagem para um ensino de ciências mais autêntico. En: *Tecné, Episteme y Didaxis*, Número extraordinario, 23-38.
- Justi, R. y Mendonça, P. C. C. (2007). *Modeling in order to learn an important sub-micro representation: the nature of the ionic bond*. Paper presented at the VI Conference of the European Science Education Research Association, Malmö, Sweden.
- Justi, R.; Ferreira, P. F. M. y Gilbert, J. K. (en prensa). The application of a 'Model of Modeling' to illustrate the importance of metavisualization in respect of the three levels of representation. En: J. K. Gilbert y D. F. Treagust (Eds.). *Chemical education: linking the representational levels of chemistry*. Dordrecht: Springer.
- Kozma, R. B. y Russell, J. (1997). Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. En: *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (9), 949-968.
- Mainzer, K. (1999). Computational models and virtual reality-New perspectives of research in chemistry. En: *HYLE* (5), 117-126.
- Mendonça, P. C. C. y Justi, R. (2007). Transição do modelo 'NaCl molécula' para o 'NaCl em rede': Análise crítica de um processo de ensino por modelagem. En: *VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*. Florianópolis.

- Reiner, M. y Gilbert, J. K. (2000). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. En: *International Journal of Science Education*, 22 (5), 489-506.
- Rouse, W. B. y Morris, N. M. (1986). On looking into the Black Box: Prospects and limits in the search for mental models. En: *Psychological Bulletin*, 100 (3), 349-363.
- Taber, K. S. (1994). Misunderstanding the ionic bond. En: *Education in Chemistry*, (31), 100-103.
- _____ (1997). Students understanding of ionic bonding: Molecular versus electrostatic framework? En: *School Science Review* (78), 85-95.
- Treagust, D. F. y Chittleborough, G. (2001). Chemistry: a matter of understanding representations. En: *Subject-Specific Instructional Methods and Activities* (8), 239-267
- Tomasi, J. (1988). Models and Modeling in Theoretical Chemistry. En: *Journal of Molecular Structure (Theochem)* (179), 273-292.