

# Algunas características clave de los modelos científicos relevantes para la educación química

Agustín Adúriz-Bravo\*

## ABSTRACT (Some key characteristics of scientific models relevant for chemistry education)

In this paper, I identify six “key” epistemological characteristics of scientific models that I deem relevant from the point of view of chemistry education. Based on previous analyses of some fundamental aspects of models, I propose that models constitute cultural representations, they are constructed from real phenomena and theoretical propositions, they mediate between theory and the world, and they aim at satisfying particular human concerns.

**KEYWORDS:** scientific models, key characteristics, model-based perspective, analogy, theory, mediation

## 1. Propósito y perspectiva del artículo

En este artículo me dedico a caracterizar la naturaleza de los modelos científicos identificando algunos de sus aspectos epistemológicos fundamentales, aspectos que denomino “características clave”; lo hago desde la mirada intencionada de la didáctica de las ciencias naturales y la didáctica de la química, es decir, buscando que la reflexión epistemológica me dé “pistas” para la mejora de la educación científica. Creo necesarias dos aclaraciones iniciales. Primeramente, lo que pongo aquí bajo el foco de análisis son los modelos elaborados por las ciencias empíricas o fácticas, que son aquellas que buscan entender la realidad que nos rodea. Así, excluyo explícitamente los modelos de las ciencias formales, como la matemática o la lógica. Más en particular, me circunscribo a los modelos de las llamadas ciencias naturales o experimentales (química, física, biología, geología, astronomía, etc.), y no me dedico a los modelos de las ciencias sociales, como la historia o la economía. Y en segundo lugar, abordo los modelos desde una perspectiva de análisis que puede ser llamada “epistémica” (*cf. Sensevy et al., 2008*); tal perspectiva se ocupa de la naturaleza, construcción y utilización de los modelos científicos como representaciones teóricas externalizadas y consensuadas del mundo, entendiendo que la actividad de modelización es uno de los elementos constitutivos de la empresa científica. Consecuentemente, en mi análisis me valgo principalmente de la disciplina epistemología (también llamada filosofía de la ciencia), y dejo fuera del cuadro las perspectivas cognitiva, lógica, lingüística y otras muchas que se pueden invocar para pensar qué son los modelos y cómo se utilizan (en Greca y Moreira,

2000; Erduran y Duschl, 2004; Gutiérrez, 2004; Halloun, 2004, se introducen algunas de estas perspectivas).

Para iniciar mi argumentación, reconozco tres puntos de partida sobre los cuales hay diverso grado de consenso en nuestra comunidad de didactas. El primero es que, si bien las nociones de modelo y modelización han estado presentes por un buen tiempo en forma implícita en los currículos de ciencias de todos los niveles educativos, es sólo recientemente que los diseñadores de esos currículos, los investigadores en didáctica de las ciencias y el profesorado de ciencias hemos comenzado a abogar por un tratamiento explícito del constructo epistemológico de modelo en la enseñanza de las ciencias (*cf. Gilbert y Boulter, 2000: caps. 1 y 2; Harrison y Treagust, 2000; Justi y Gilbert, 2002; Khine y Saleh, 2011: caps. 3 y 10*). El segundo punto de partida es que la producción didáctica en torno a los modelos y la modelización ha alcanzado niveles de detalle y sofisticación importantes, pero que, sin embargo, los didactas de las ciencias aún nos debemos discusiones sobre aspectos básicos e irreducibles, discusiones que han sido apantalladas o salteadas por un supuesto consenso, a mi juicio demasiado apresurado, en torno al significado mismo de la idea de modelo (*cf. Joshua y Dupin, 2005: 18-19; Koponen, 2007; Adúriz-Bravo, en prensa*). Y el tercer punto es que parece estar emergiendo una nueva forma de entender los modelos desde la didáctica de las ciencias que —con mayor o menor conciencia por parte de los didactas— recoge conceptualizaciones epistemológicas recientes y actuales que podríamos calificar de “modeloteóricas” (en inglés, “model-based”) (Grandy, 2003; Koponen, 2007; Adúriz-Bravo, 2010; Oh y Oh, 2011).

Los tres puntos antedichos me llevan a sostener la tesis de la necesidad y urgencia de tomar algunas decisiones teóricas en la didáctica de las ciencias: deberíamos intentar decidir qué concepciones de modelo científico —de las muchas disponibles en la epistemología— pueden ser útiles para el profesorado y el estudiantado de química a la luz de las exigencias actuales para la educación química, expresadas en los

\* GEHyD-Grupo de Epistemología, Historia y Didáctica de las Ciencias Naturales, CeFIEC-Instituto de Investigaciones Centro de Formación e Investigación en Enseñanza de las Ciencias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Correo electrónico: [aadurizbravo@cefiec.fcen.uba.ar](mailto:aadurizbravo@cefiec.fcen.uba.ar)

nuevos currículos del siglo XXI. En este sentido, mi propósito en este artículo es volver a la discusión acerca de algunas cuestiones fundamentales en torno a qué son los modelos y por qué se los necesita (*cf.* Grandy, 2003), cuestiones que podrían servir como insumo para justificar aquellas decisiones. Retomar un estudio de fundamentos me lleva a reconocer algunas características clave de los modelos que, entiendo, son muy relevantes para la didáctica de las ciencias y de la química.

Rufina Gutiérrez (2005) realiza una argumentación similar en torno a la necesidad de discutir sobre los fundamentos de los modelos mentales, un constructo de la ciencia cognitiva que para ella es tomado por la didáctica de las ciencias naturales sin demasiado examen crítico. En ambos casos, los didactas no estaríamos reconociendo que la complejidad y polisemia de este tipo de constructos es una dificultad para su utilización en nuestro propio campo. En este sentido, las frases que ella emplea al referirse al término de “modelo mental” me parecen muy pertinentes también para el de “modelo científico”:

En [los] artículos se observa un uso tan plural del término, que nos permite afirmar que el constructo, claramente identificado y definido como un término técnico [...] se está vertiendo en la literatura relativa a la [d]idáctica de las [c]iencias como un término genérico, cargado de polisemia, que hace imposible reconocer lo genuino del concepto. La consecuencia de esta diversidad de comprensiones, es la imposibilidad de que en la investigación didáctica se den las condiciones para la construcción de conocimiento científico en este campo, ya que el hecho de la polisemia hace imposible la convergencia necesaria en las distintas investigaciones que permitan la comunicación clara, la comparación, la discusión y la evaluación de resultados y el consenso entre la comunidad científica. Se advierte [también] que la polisemia está actuando como un obstáculo en la actividad docente [...] (Gutiérrez, 2005: 209).

## 2. Seis características clave de los modelos científicos

Ya varios autores ubicaron la discusión didáctica sobre los modelos científicos en algunos aspectos epistemológicos que podríamos considerar fundamentales y reconocer como importantes para la didáctica de las ciencias y de la química (por ejemplo: Joshua y Dupin, 2005: cap. 1; Lombardi, 1998; Grandy, 2003; Erduran y Duschl, 2004; Gallego Badillo, 2004; Izquierdo-Aymerich, 2004; Justi, 2006; Koponen, 2007). De entre todos esos trabajos, me interesan particularmente los de José Antonio Chamizo (2006) y Phil S. Oh y Sung J. Oh (2011), por el enfoque elegido por los autores, que es similar al que asumo en este artículo. En esos dos textos, los especialistas exponen caracterizaciones generales de la naturaleza de los modelos científicos, admitiendo “su importancia en prácticamente cualquier nivel educativo” (Chamizo, 2006: 476; la traducción es mía) y apuntando a poder “formar al profesora-

do de ciencias y alentarlo a usar apropiadamente los modelos en sus aulas” (Oh y Oh, 2011: 1109; la traducción es mía).

En su trabajo, Chamizo (2006) identifica lo que para él son las ocho características “menos controvertidas” (p. 476) de los modelos científicos:

1. Los modelos son *representaciones* de objetos, sistemas, fenómenos o procesos. Un modelo siempre es un modelo *de algo*. Los modelos en tanto que representaciones simplifican lo que representan y pretenden entenderlo.
2. Los modelos son *instrumentos para* intentar responder las preguntas científicas. Los modelos se emplean para obtener información de hechos a los cuales no tenemos acceso directo.
3. Los modelos *guardan analogía* con los fenómenos que representan. Los modelos son similares a la realidad hasta cierto grado, y nos permiten derivar hipótesis susceptibles de ser puestas a prueba.
4. Los modelos son *distintos* de (y más simples que) la realidad, porque responden a un *sentido*: para qué se propusieron, de dónde vienen y adónde van.
5. Los modelos *se construyen* en un compromiso entre las analogías y las diferencias que tienen con la realidad que representan. Por tanto, los modelos se pueden ampliar y corregir.
6. Los modelos *se desarrollan* a lo largo de la historia, en un proceso iterativo de revisión para acomodar la nueva evidencia empírica.
7. Los modelos *deben ser aceptados* (consensuados) por la comunidad científica. La ciencia es conocimiento público y validable.
8. Se puede *clasificar los modelos en tipos*. La clasificación de los modelos en icónicos (imágenes y maquetas) y conceptuales (relacionados con el lenguaje, como símbolos y fórmulas) “parece ser de las más relevantes para discutir el aprendizaje” (Chamizo, 2006: 479).

Por su parte, Oh y Oh (2011) presentan “una revisión de la naturaleza de los modelos y sus usos en el aula de ciencias para formadores del profesorado de ciencias y, subsecuentemente, profesores [y profesoras] de ciencias” (p. 1111; la traducción es mía). A partir de un análisis de la literatura disponible, ellos encuentran “subtópicos concernientes a la naturaleza de los modelos y la modelización” (p. 1111; la traducción es mía). En forma similar a Chamizo, buscan algunos consensos que, en torno a estos subtópicos, se dan entre epistemólogos y didactas de las ciencias. Los cinco subtópicos identificados por ellos son:

1. *Significados de la idea de modelo.* Los autores señalan que no hay una única definición de modelo, pero que comúnmente se usa el término “representación” a la hora de explicar qué son los modelos.
2. *Propósitos de la modelización.* Usualmente se considera que las principales metas de los modelos son describir, explicar y predecir determinados aspectos del mundo natural.

3. *Multiplicidad de los modelos científicos.* Es posible construir muchos modelos distintos para el mismo fenómeno “blanco”. Esto se debe a que la comunidad científica puede sostener diferentes perspectivas y a que los modelos sólo se enfocan en determinados aspectos del fenómeno.
4. *Cambio en los modelos científicos.* En cada momento histórico, los modelos son consensuados por la comunidad científica. A lo largo de la historia, esos modelos se someten a revisión.
5. *Usos de los modelos en el aula de ciencias.* El empleo que hace el profesorado de los modelos científicos en la enseñanza “está justificado en la idea de que presentaciones externas de representaciones visuales brindan apoyo para construir y razonar con representaciones internas: los modelos mentales” (Oh y Oh, 2011: 1120; la traducción es mía).

Puede verse entonces que el trabajo de Oh y Oh (2011) bosqueja cinco grandes preguntas sobre los modelos y después resume algunas respuestas vigentes y difundidas; esas respuestas se parecen mucho a los puntos de consenso encontrados por Chamizo (2006). En este artículo pretendo avanzar un poco más a partir de esas dos caracterizaciones, identificando seis características clave de los modelos que retoman, combinan o matizan las de los trabajos citados. Mi objetivo es desarrollarlas con cierto detalle para proveer insumos para la discusión teórica en didáctica de las ciencias.

Por una parte, es usual considerar que los modelos científicos son “modelos de” algo; quiero revisar el alcance de esta expresión, que a mi juicio es polisémica, y acotar algunos sentidos muy concretos, resaltando que los modelos de las ciencias naturales se pueden pensar como *modelos-a-partir-de algo*. En segundo lugar, los modelos científicos han sido retratados como “modelos para” algo; en este artículo reconozco al menos tres significados de esta frase que tienen que ver con que los modelos científicos son productos *sociales y culturales*. Además, adhiero a la conceptualización de que todo modelo científico es una *analogía*, e inspecciono alguna consecuencia de tal conceptualización. Luego abordo el carácter *teórico* de los modelos científicos, definiéndolo con más precisión a través de vincular los modelos con la idea de teoría, que es una idea ampliamente conocida y utilizada en el campo de la enseñanza de las ciencias. En último lugar, recupero la idea de *mediación*: trato de mostrar cómo los modelos científicos median entre teoría y realidad por su naturaleza “híbrida”. Para todo lo anterior, *introduzco diversos criterios que dan lugar a clasificaciones de los modelos científicos*, atendiendo a una variedad de intereses.

La tabla 1 reseña las seis características clave que acabo de enumerar, y recoge la forma en que se encuentran representadas en los dos antecedentes que he revisado más arriba.

Las siguientes secciones del artículo están dedicadas a ahondar en las características 2 a 6 de la tabla. La característica 1 no tiene sección propia, ya que en cada uno de los otros cinco casos explícito qué criterios clasificatorios estoy

introduciendo para la discusión y qué resultados obtengo al aplicarlos.

### **3. ¿En qué sentido los modelos son “modelos-de”?**

La idea bastante directa y de sentido común de que los modelos son “de algo” es asociada sin más a la naturaleza de los modelos como *re-presentaciones* de un objeto, es decir, como presentaciones “subrogantes” de ese objeto en su ausencia. Sin embargo, considero que —incluso en formulaciones muy sencillas— el nexo “de” tiene varios significados que conviene distinguir, al menos como ejercicio de clarificación conceptual. Con este propósito en mente, quiero volver la mirada hacia las diversas maneras en que el término “modelo” se utiliza en el lenguaje natural. En esta sección voy a analizar dichas maneras trayendo a colación dos criterios de clasificación de los modelos que conducen a reconocer la existencia de varias categorías de modelo científico.

En castellano podemos decir que “Gala fue muchas veces *modelo de Dalí*”, o que “una réplica de juguete es un *modelo de* un coche de Fórmula 1”. Estos dos usos de la preposición “de” plantean una paradoja interesante, porque, en un caso, “modelo” queda refiriendo a la “materia prima” a ser representada y, en otro caso, a la representación que se hace de esa “materia prima”. Gala remite al *input* (punto de partida) de un proceso de representación-modelización: el objeto real (en este caso, una persona de carne y hueso) que se representa de alguna manera (en obras de arte). La réplica de juguete, en cambio, remite al *output* (punto de llegada) del proceso: una representación simbólica en un medio particular (en este caso, una réplica a escala de metal y plástico) que se hace de un objeto real (el coche de carreras). Entonces, es posible clasificar los modelos de acuerdo con el lugar que ocupan en el proceso de representación-modelización: pueden ser *modelos-input*, cuando denotan lo que está allí para ser modelizado, o *modelos-output*, cuando denotan el resultado de la instancia de modelización.

La epistemología “clásica” posterior a la Segunda Guerra Mundial, heredera del positivismo lógico del Círculo de Viena, reconoció estos dos sentidos opuestos del término “modelo” y propuso que los modelos de las ciencias empíricas son *modelos-output* o *modelos-representación* (*cf.* Mosterín, 1984; Estany, 1993). En efecto, para esta epistemología de corte formalista, *un modelo de las ciencias naturales típico es siempre un modelo que surge de la representación de un sistema real*; se excluye de esas ciencias, entonces, la idea de que un modelo sea una porción del mundo representable o representada. De acuerdo con esta “definición” de modelo, un *ácido* sería una categoría abstracta de la química que representa-modeliza distintas sustancias reales que guardan un “parecido de familia” entre sí: su sabor, su comportamiento en agua, su composición química, etc. (Por supuesto, el alcance de ese parecido de familia depende de la perspectiva teórica que estemos considerando; retomo este punto en las secciones que siguen.)

Ahora bien, podemos complejizar el cuadro e introducir una segunda clasificación que es relativamente independiente

**Tabla 1.** Seis características clave de los modelos científicos, y la manera en que estas aparecen recogidas en los artículos de Chamizo (2006) y Oh y Oh (2011).

Características clave de los modelos	Chamizo, 2006	Oh y Oh, 2011(mi traducción)
1. Los modelos científicos se pueden clasificar según distintos criterios	"Los modelos pueden ser: icónicos y conceptuales." (p. 479; cursivas en el original)	"La química es [una disciplina] en la cual se utilizan varios tipos de modelos en diferentes niveles —tales como el nivel observacional/macroscópico, el molecular/microscópico y el simbólico— con fines de investigación y enseñanza [...]." (p. 1118)
2. Los modelos científicos son modelos-a-partir-de	"Obviamente los modelos lo son de 'algo'." (p. 477)	"Para decirlo de una manera sencilla, un modelo es algo que representa alguna otra cosa." (p. 1112)
3. Los modelos científicos se construyen para unas determinadas finalidades y valores	"Los modelos se construyen para responder una o varias preguntas [importantes en determinado tiempo y lugar] sobre una determinada parte del mundo, por ello es crucial identificar el sentido del modelo (...). Así se está en posibilidades de reconocer lo que se ha eliminado de la totalidad del mundo para poder entenderlo mejor." (p. 478)	"Un modelo científico en tanto que dispositivo de pensamiento y comunicación sirve para describir, explicar y predecir fenómenos naturales y para comunicar ideas científicas a otros. [...] Un modelo representa [su fenómeno] blanco de una manera determinada, dependiendo del tipo de problema o de la intención del modelizador." (pp. 1116-1117)
4. Los modelos científicos son analógicos respecto de la realidad	"[La idea de 'grado de similitud'] nos remite de manera muy clara a que la analogía no es la realidad. De hecho la analogía se separa de la realidad que intenta representar una vez que ante la prueba experimental se encuentra información que no puede 'acomodar'. Así, las analogías y los modelos que se construyen [...] son reemplazables por otros que sí pueden incorporar la nueva evidencia." (p. 478)	"Muchos autores acuerdan en que la capacidad explicativa de un modelo proviene del uso de la analogía." (p. 1115)
5. Los modelos científicos son construcciones teóricas	"[L]o que enseñamos son modelos y no realidades. [...] [S]e puede establecer de manera muy clara la distancia que separa la construcción teórica (científica, social, histórica) del mundo real [...]." (p. 481)	"Se pueden desarrollar múltiples modelos para el mismo [fenómeno] blanco, porque los científicos [y científicas] pueden tener diferentes ideas [...] y porque hay una variedad de recursos semióticos disponibles para construir un modelo." (p. 1124)
6. Los modelos median entre teoría y realidad	"Actualmente se discute si la ciencia puede expresarse sin la necesidad de leyes [...] y si los modelos conceptuales pueden ser identificados con éstas. En caso de serlo, la clasificación de Suppe [de las leyes en tres tipos —coexistencia, sucesión e interacción—] puede resultar también, con las cautelas del caso, una clasificación de los modelos conceptuales." (pp. 479-480)	"En un sentido pragmático, un modelo es a menudo comparado con un 'puente' o visto como un 'mediador', dado que juega el papel de conexión o transición entre teoría y fenómeno [...]. [U]n modelo existe entremedio de proposiciones teóricas y objetos del mundo real, conectando las dos entidades [...]." (pp. 1113-1114)

de que los modelos sean objetos reales o representaciones simbólicas (Adúriz-Bravo, en prensa). Miremos para ello los siguientes ejemplos: es posible decir que “el Chapulín Colorado personifica el *modelo del antihéroe*” o que “una maqueta sirve de *modelo del túnel internacional*”. Nuevamente, el uso de la preposición “de” es problemático, porque, en el primer caso, “modelo” queda refiriendo a algo obtenido a partir de ciertas directrices generales y abstractas y, en el segundo caso, a las directrices seguidas para producir algo. Hagamos entonces la siguiente distinción: identificaremos al Chapulín Colorado con un *modelo-a-partir-de*, esto es, una concreción hecha a partir del canon de antihéroe. La maqueta, en cambio, se identificará con un *modelo-para*: un objeto que funciona a modo de “plano”, proveyendo instrucciones para concretizarlo en una construcción real.

La epistemología clásica también ha reconocido esta distinción (a menudo solapándola completamente con la anterior), y ha señalado que los modelos científicos empíricos son modelos-a-partir-de. Con esta nueva clasificación, un *ácido* en química podría ser una sustancia real que satisface una

serie de constreñimientos teóricos de partida (diferentes para Arrhenius, para Brønsted y Lowry, o para Lewis), o también podría ser una representación simbólica (una “estructura”) abstraída a partir de reconocer esos constreñimientos en el mundo. (No está de más aclarar que, si tenemos en cuenta la discusión de más arriba, para los epistemólogos “neopositivistas” sólo este segundo sentido sería “epistemológicamente aceptable”, puesto que el modelo de ácido debería ser modelo-a-partir-de y modelo-ouput al mismo tiempo.)

#### 4. ¿En qué sentido los modelos son “modelos-para”?

La mayoría de los trabajos que he citado en la primera sección del artículo insisten en que los modelos científicos existen, se construyen o se utilizan “para algo”, es decir, con la intención de lograr distintos propósitos. Aunque acuerdo con esta idea general, creo posible distinguir tres comprensiones levemente distintas de la preposición “para”, que resultaría interesante repasar.

En primer lugar, los científicos y científicas han creado los

modelos con el fin de satisfacer una serie de pretensiones epistémicas sostenidas para la actividad científica: entre ellas, describir, entender, predecir, controlar, transformar o comunicar la realidad natural. Así, surge un criterio de clasificación *funcional* de los modelos, según ellos se usen principalmente para alcanzar un objetivo u otro (cf. Oh y Oh, 2011). Sería lícito hablar entonces de modelos “exploratorios” (para aproximarse a un fenómeno desconocido), “taxonómicos” (para describir y clasificar), “heurísticos” (para crear nuevos significados), “cibernéticos” (para controlar procesos), “didácticos” (para explicar a otros), etc.

Oh y Oh (2011) ejemplifican esta idea de la diversidad de funciones de un modelo científico con los modelos altamente matematizados del electromagnetismo de Maxwell, quien los habría construido con el fin de “[organizar] mucha información y volver tangibles procesos de razonamiento complejos de modo que guiaran y apoyaran inferencias perceptuales” (p. 1115; la traducción es mía).

En segundo lugar, los modelos capturan solo determinados aspectos de los sistemas reales, que son muy complicados y poseen muchos componentes profusamente interrelacionados. Al modelizar esos sistemas, los científicos y científicas retienen únicamente unos pocos elementos de interés, que responden a determinadas preguntas atravesadas por intenciones y valores. Así, “[l]os hechos no son independientes de los observadores y de sus maneras de ver el mundo” (Chamizo, 2006: 477).

Entonces, un segundo sentido de “para” es el *pragmático*: los modelos dan respuesta a determinadas inquietudes y se crean desde determinadas perspectivas socialmente aceptadas. Se podría decir entonces que los modelos son “hijos de su lugar y de su tiempo”: se dirigen a responder unas preguntas vigentes en un momento de la historia de la ciencia, proveyendo respuestas que dependen de la cultura (ideas, expectativas, prejuicios, visiones de mundo, compromisos, etc.) compartida por una comunidad científica.

Chamizo (2006) ejemplifica este punto con el modelo atómico “del octeto” propuesto por Lewis y Langmuir (mucho menos conocido en la escuela que los modelos de Thompson, Rutherford o Bohr, dado que obedece a una mirada *química* y no física). El modelo de Lewis-Langmuir

busca explicar la naturaleza del enlace químico y la estructura de las moléculas[;] el que los electrones no caigan al núcleo o que no se repelan entre sí, tiene poca importancia una vez que con su uso se responde a las preguntas que importaban en su tiempo (y aún hoy en día) a los químicos, aquéllas relacionadas con la estructura molecular [...]. (Chamizo, 2006: 478)

Un tercer sentido de “para” es el que expuse en la sección anterior (oponiéndolo a “a partir de”); así, un modelo puede ser un *paradigma* (una entidad real para ser imitada) o un *diseño* (un esquema simbólico para ser efectuado) (Adúriz-Bravo, en prensa). Este tipo de modelos, como ya dije, se exclu-

yerón de la conceptualización epistemológica clásica; solo fueron recuperados por la llamada *nueva filosofía de la ciencia* a partir de la década del 50. Tal recuperación fue particularmente impulsada por la idea de “ejemplar”, propuesta por Thomas Kuhn (1970), tal como mencionaré más abajo.

Quiero ahora argumentar en favor de que, a mi juicio, todo modelo de las ciencias naturales es, además de modelo-a-partir-de, modelo-para. El término “modelo”, en su uso técnico, captura, combina y supera los dos significados diferentes (y, desde el sentido común, parcialmente opuestos) de la palabra latina “modus”, de la cual deriva. *Modus* significa “manera” (como se ve en el derivado “modales”) y “medida” (como se ve en el derivado “módulo”). Una manera es hasta cierto punto identificable con un modelo-para, ya que es la forma en que algo existe u ocurre; una medida es hasta cierto punto identificable con un modelo-a-partir-de, ya que es un grado, intensidad, proporción o correspondencia determinados por comparación. Pero podría argüirse que *toda manera es una medida*, es decir, que el conjunto de rasgos característicos de una cosa puede servir como unidad o patrón para que otras cosas sean comparadas con él.

Si proyectamos esta idea a los modelos científicos, podemos pensar que un modelo capta los elementos esenciales de un sistema y se convierte así en una forma de comprender otros sistemas. Por ejemplo, la “manera” lavoisieriana de mirar la oxidación de ciertos metales prototípicos (el mercurio, el hierro, el plomo) como combinación de estos con una parte del aire sirve de “medida” para mirar otras oxidaciones más complejas o menos conocidas en la época, hacia las cuales se “transporta” el corpus teórico.

## 5. Los modelos y las analogías

El epistemólogo estadounidense Ronald Giere —buen representante de la escuela contemporánea conocida como “semantismo”, que retomaré más abajo— adhiere a una definición de los modelos científicos que enfatiza su carácter analógico. Él denomina “modelo teórico” a una entidad abstracta, no lingüística, que se comporta exactamente según lo prescrito por una serie de enunciados o proposiciones (en cualquier sistema simbólico), que se dice que “definen” esa entidad (Giere, 1992: 102-103). Para Giere (1992: 106-111), los modelos teóricos se relacionan sustantivamente con dos elementos: 1) el conjunto heterogéneo de recursos expresivos utilizados para caracterizarlos, y 2) los sistemas reales de los cuales son modelos, con los que mantienen una relación de “parecido de familia” que él técnicamente llama “similaridad”. De cada modelo científico, entonces, cabe afirmarse que es similar al sistema que modeliza *en tales y cuales aspectos y con tales y cuales grados de ajuste*.

Cabe aclarar que la similaridad no se refiere a un parecido superficial entre modelo y fenómeno, ya que ella es de carácter altamente teórico. En el modelo aparecen entidades imaginadas sin pretensión de correlato real; es por ello que Morrison y Morgan (1999) dicen que el modelo es “representativo” del sistema físico, y no una mera representación. En palabras

de Raviolo (2009: 56), “a diferencia de las analogías, los modelos pueden no mantener la similitud estructural entre los dominios. Un modelo es una construcción abstracta, no es una copia de la realidad; por el contrario, puede resultar más útil cuanto más difiere de ella”.

La idea giereana de similaridad, entonces, pretende operacionalizar la concepción de que los modelos son análogos (teóricos) de sus sistemas. Los modelos no son el mundo, sino una analogía que “se parece” a él en algunos toques (y, por tanto, difiere en muchos otros). Como lo describe Alex Rosenberg:

La pregunta empírica o fáctica sobre un modelo es si se “aplica” lo suficientemente cerca a algo como para ser científicamente útil —para explicar y predecir su comportamiento. Por lo tanto, será una hipótesis que el modelo newtoniano se aplica suficientemente bien a, o está suficientemente bien satisfecho por, el Sistema Solar. Una vez que especificamos “bastante bien” o “suficientemente satisfecho por”, ésa es una hipótesis que por lo general resulta ser verdadera. [...] Una teoría es un conjunto de hipótesis que afirman que conjuntos particulares de cosas en el mundo son satisfechos en diversos grados por un conjunto de modelos que reflejan una cierta similaridad o unidad. (Rosenberg, 2000: 98; la traducción es mía)

Entender los modelos como analogías tiene como consecuencia directa el hecho de que es posible aumentar el ajuste entre un modelo científico y el sistema que modeliza, conforme se recolectan nuevas evidencias empíricas o se realizan nuevos avances teóricos. Así, la ciencia trabaja con “conjuntos de modelos sucesivamente más complejos” (Rosenberg, 2000: 98; la traducción es mía) para capturar mejor la realidad. Para ejemplificar esta idea, Rosenberg (2000), Chamizo (2006) y Niaz (2009: cap. 4) revisan lo que yo llamo el “campo estructurante” de los gases a lo largo de la historia de la química. Así, puede verse que, a la primera aproximación clásica de un gas “ideal” ( $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ), investigadores como van der Waals, Berthelot o Clausius fueron añadiendo sofisticaciones con el fin de que sus modelos dieran cuenta cada vez mejor del comportamiento de los diferentes gases reales en una diversidad de condiciones.

Que los modelos sean análogos de sus fenómenos me sirve para justificar por qué considero que todo modelo científico es un modelo-para; a mi entender, la similaridad puede ser “transportada” entre diversos modelos y fenómenos. Para Giere, al menos algunos de los modelos teóricos son “también ejemplares conforme a los cuales se construyen otros modelos teóricos” (Giere, 1992: 103; cursivas en el original):

Cuando se enfrentan con un nuevo fenómeno, los científicos [y científicas] pueden buscar fenómenos conocidos que son de varias maneras similares —o, lo que es lo mismo, análogos— al nuevo fenómeno. Cuando se encuentran [esos fenómenos conocidos], el tipo de modelos que

daban cuenta satisfactoriamente de [ellos] pueden ser adaptados al nuevo fenómeno. (Giere, 1999: 56; la traducción es mía)

La conceptualización de los modelos como analogías, además, tiene una conexión estrecha con mi siguiente característica clave. De los modelos científicos no cabe decir *directamente* que son verdaderos o falsos, puesto que se trata fundamentalmente de entidades no-lingüísticas (a menudo “imaginísticas”). Entonces, emerge una nueva visión “semántica” de las teorías, “según la cual ellas son conjuntos de modelos, esto es, de definiciones formales, junto con aserciones acerca de qué cosas del mundo satisfacen esas definiciones” (Rosenberg, 2000: 99; la traducción es mía). Los modelos son estructuras similares al mundo, pero que, al mismo tiempo, se pueden agrupar en clases que satisfacen “condiciones” impuestas por un marco teórico que les es afín.

## 6. Los modelos y las teorías

En el campo de la ciencia y la tecnología, es usual encontrar definiciones de “modelo” que lo homologan con una representación “teórica” de una realidad compleja que se elabora con el fin de facilitar el estudio de su comportamiento (ver, por ejemplo, las respectivas entradas en los diccionarios de la Real Academia Española y Merriam-Webster). Hay entonces un reconocimiento generalizado de que los modelos no son *íconicos* respecto de la realidad, es decir, no se limitan a reflejarla o imitarla (Koponen, 2007; Adúriz-Bravo, 2011); antes bien, “pueden ser creados de manera novedosa para expresar ideas abstractas e incluir entidades teóricas” (Oh y Oh, 2011: 1113; la traducción es mía). Toca entonces fijar un poco mejor en qué sentido los modelos son “teóricos”. “Teoría” proviene de una palabra griega que significa “mirada”. Se la puede considerar como

[...] un conjunto estructurado de ideas abstractas que permiten explicar los fenómenos del mundo natural por referencia a entidades y procesos en gran medida “inventados”, pero que guardan una relación compleja e interactiva con la realidad. (Adúriz-Bravo, 2005: 17)

Es común que, al analizar la naturaleza de la actividad científica, se ponga énfasis en la relación estrecha de los modelos con las teorías. La definición clásica de más arriba destaca los aspectos abstractos y simbólicos de un modelo: el modelo está “cargado de teoría”, porque supone una cierta mirada intencionada sobre los fenómenos, que se fija en determinadas cuestiones y busca satisfacer determinados objetivos. Por otra parte, esa definición pone en valor el propósito de que los modelos “medien” entre la realidad y nuestra comprensión teórica de la misma.

Para entender esta insistencia en la “dependencia” de los modelos respecto de las teorías, me referiré a algunas de las caracterizaciones de la idea de modelo científico propuestas por la epistemología del siglo XX. Sólo me concentraré en

este período de tiempo tan corto por dos motivos: porque el constructo de modelo fue introducido hace relativamente poco, y porque fue consistentemente invisibilizado por los análisis epistemológicos clásicos, que se ocuparon fuertemente de las teorías, ubicándolas en el lugar de las unidades estructurales y funcionales de la ciencia.

Resumidamente, las ideas epistemológicas acerca de qué es un modelo científico han ido cambiando desde 1920 hasta nuestros días de una manera que, en mi opinión, puede ser reconstruida —omitiendo detalles técnicos fuera del alcance de este artículo— con la ayuda de la noción intuitiva de “ejemplo”. Según mi reconstrucción, en el período considerado ha habido tres grandes concepciones acerca de los modelos (Adúriz-Bravo, 2011, en prensa):

1. Para el positivismo lógico y la concepción heredada (c. 1920-1960), un modelo científico es un ejemplo *cualquiera* de una teoría; como dije, la teoría se considera la entidad central para el análisis epistemológico.
2. Para la nueva filosofía de la ciencia (c. 1950-1980), el modelo se convirtió en un ejemplo *paradigmático* (esto es, digno de imitación) de una teoría.
3. Por último, para la concepción semántica de las teorías científicas (c. 1970 hasta hoy), el modelo está identificado con un ejemplo *intencionado* de la teoría (vale decir, un ejemplo que la teoría está interesada en explicar).

La muy influyente concepción heredada de las teorías científicas, de los años 50 y 60, estudió en profundidad los aspectos lógicos y lingüísticos del conocimiento científico. Para los epistemólogos de esta escuela, las teorías empíricas eran cálculos axiomáticos “interpretados” (en el sentido de la lógica formal). En ese contexto, un modelo era una entidad menor, carente de interés: podía ser reducido a un sistema (estructura) que “satisfacía” todos y cada uno de los axiomas de la teoría científica, convirtiéndose en *modelo de esa teoría* después de este proceso de “interpretación” (Díez y Moulines, 1999).

Con la aparición de la nueva filosofía de la ciencia en los años 60 y 70, Thomas Kuhn propuso centrarse en otra cara de la idea de modelo que, según su opinión, era central para entender el funcionamiento de la empresa científica. Cuando trató de clarificar y precisar su noción de paradigma, Kuhn formuló el constructo de ejemplar, que puede ser entendido como un modelo científico “a imitar” en la búsqueda de nuevas soluciones a los problemas que se investigan, soluciones que deben estar inspiradas en las soluciones canónicas y fundamentales que son seguidas de cerca cuando se hace ciencia “normal” (cf. Kuhn, 1970; Díez y Moulines, 1999).

La tercera y última “parada” en este viaje histórico se ubica en la emergente concepción semántica y modeloteórica de las teorías científicas, de los años 70 y 80. Dentro de ella, y en especial para los miembros del programa llamado “estructuralismo metateórico”, los modelos son el centro de la parte “aplicativa” de una teoría; constituyen un conjunto o clase

que puede ser caracterizado por las leyes científicas (los axiomas *sensu stricto*) de esa teoría (Díez y Moulines, 1999). En esta línea, los modelos de una teoría son “proyecciones” de la teoría sobre el mundo, o sus “realizaciones posibles”; pueden ser entendidos como los correlatos formales de los trozos de la realidad que ella pretende explicar. Estos que podríamos clasificar como “modelos-fenómenos” pasan ahora a formar parte integral de la teoría.

El semanticismo añade, a la reconstrucción de los modelos de Kuhn como “casos” que han sido bien resueltos y por ello sirven como ejemplares, el requisito más clásico de que todos ellos puedan ser representados de una manera semiformal análoga y puedan ser formulados de la manera más general y abstracta posible (Izquierdo-Aymerich, 2007). Por tanto, el semanticismo representa una “tercera vía” entre la concepción heredada y la nueva filosofía de la ciencia, que recurre a las herramientas más potentes de ambas escuelas para pensar acerca de los modelos:

[E]sta “doble estrategia”—que pretende recuperar lo mejor de cada uno de los períodos precedentes—constituye una de las características fundamentales de este enfoque [semántico]. (Lorenzano, 2001: 38)

## 7. Los modelos y la mediación

En esta sección argumento que la idea de mediación aparece como una solución refinada a la “cuestión epistemológica de los modelos en la representación de los fenómenos del mundo físico y de la relación de esos modelos con la teoría” (Koponen, 2007: 754; la traducción es mía).

Comencemos por mirar cómo, a partir de las dos características clave anteriores, podemos extraer una conclusión importante sobre la naturaleza de los modelos científicos. Por una parte, los modelos comparten hasta cierto punto su “esencia” con los fenómenos que modelizan, pues son análogos a ellos. Por otra parte, los modelos comparten parcialmente su “esencia” con las teorías con las que se relacionan, ya que pueden ser “capturados” por formulaciones simbólicas (incluyendo las lingüísticas) muy estructuradas sintácticamente, formulaciones que juegan un papel importante en la arquitectura de esas teorías. Los modelos, entonces, “corporizan partes de las teorías científicas” (Schwarz y Gwekwerere, 2007: 160; la traducción es mía)—por ejemplo, sus leyes—y a la vez “ayudan a desarrollar una teoría a partir de datos y a proyectar esa teoría sobre el mundo natural” (Oh y Oh, 2011: 1114; la traducción es mía). Por lo antedicho, se puede afirmar que los modelos científicos tienen un carácter “híbrido”, a mitad de camino entre las teorías y el mundo.

Podríamos intentar explicar esta idea desafiante con la “analogía de la clementina”. Una clementina es un híbrido entre una naranja y una mandarina; se parece a ambas y no es ninguna de ellas. Al poner la clementina junto a una naranja se destaca el carácter “anaranjado” de la fruta; puesta junto a una mandarina, aparece el carácter “amandarinado”. Análogamente, los modelos científicos son “fenómenos estilizados”

(modelos-output), y por tanto se parecen a porciones del mundo, y son “concreciones de la teoría” (modelos-a-partir-de), y por tanto se parecen a enunciados compactos en lenguajes científicos elaborados. Gracias a este carácter *dual*, no reducible ni a teoría ni a empiría (Justi, 2006), y *semi-autónomo*, no completamente dependiente de formulaciones teóricas ni de resultados experimentales (Koponen, 2007), los modelos científicos pueden trabajar como *mediadores* entre esos dos campos (cf. Lombardi, 1998; Morrison y Morgan, 1999; Greca y Moreira, 2000).

Hay tres autores semanticistas contemporáneos que han tratado extensamente el tema de la naturaleza de los modelos científicos: además del ya mencionado Ron Giere (nacido en 1938), están Frederick Suppe (nacido en 1940) y Bas C. van Fraassen (nacido en 1941). Estos epistemólogos, si bien han llegado a construir marcos teóricos distintos con el fin de concebir la naturaleza de la ciencia (cf. Estany, 1993; Díez y Moulines, 1999), confluyen al asumir que no existe una relación directa entre lo que decimos del mundo (proposiciones) y la manera en que ese mundo se nos muestra (fenómenos); esta relación está mediada por los modelos, entendidos *a la vez* como representaciones abstractas de la realidad y como satisfacciones de los sistemas teóricos.

Así, los modelos se ubican en el vértice de una estructura en forma de “V”, conectados con las teorías por un lado y con los fenómenos por el otro, sin que a su vez haya conexión sustantiva entre estos dos conjuntos de entidades. Como lo describe Ismo Koponen (2007): “los modelos contienen una cantidad sustancial de conocimiento teórico bien articulado, a través de los principios teóricos involucrados en su construcción” (p. 762; la traducción es mía) y a la vez se ajustan (o se pretende que se ajusten) a unos “modelos de datos” provistos por las “leyes experimentales”, que son descripciones abstractas e idealizadas de resultados de los experimentos e intervenciones.

## 8. A modo de conclusión

Inicié este artículo apoyándome en tres puntos de partida: 1) que la enseñanza de la química actual propone que el estudiantado de los distintos niveles educativos no sólo aprenda modelos famosos y se involucre en actividades de modelización, sino que también se aproxime a una comprensión de la categoría epistemológica de modelo, 2) que cualquier discusión en el aula sobre la naturaleza y uso de los modelos químicos debería cimentarse sobre unas clarificaciones y consensos iniciales, y 3) que ya comienza a circular entre el profesorado de química una conceptualización de los modelos que abreva en la actual epistemología modeloteórica, de corte semanticista, que muchos didactas consideramos educativamente valiosa (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003; Develaki, 2007; Merino Rubilar e Izquierdo-Aymerich, 2011). Creo que la exposición que desarrollé —basada en unas pocas características clave— sirve como insumo para contribuir a aumentar nuestra comprensión acerca de los modelos científicos desde el campo de la didáctica de la química (punto de

partida 2). Esto, a su vez, repercute en la calidad de la enseñanza de la química al ayudarnos a decidir cuáles definiciones de modelo son pertinentes y valiosas (punto de partida 3), sobre todo a la hora de favorecer en las aulas de química una discusión acerca del constructo de modelo como parte fundamental de la naturaleza de la ciencia (punto de partida 1).

Un segundo valor de la argumentación de este artículo derivaría del hecho de que, a mi juicio, se pueden relacionar entre sí mis seis características clave para insistir en la necesidad de poner en valor las teorías en la enseñanza de las ciencias, necesidad que ya planteó hace dos décadas Richard Duschl (1997). A lo largo de la historia de las reformas de la educación química, el valor de las teorías muchas veces ha quedado desdibujado por un énfasis exagerado en la indagación experimental o por una identificación abusiva entre enseñanza teórica y exposición “magistral”. Sin embargo, el elemento teórico de la ciencia es la “conquista humana” que los currículos de ciencias prescriben transmitir a las nuevas generaciones. Ese elemento es cultural y no “sale del mundo”; debe ser enseñado explícitamente. De allí la centralidad que atribuyo a los modelos científicos en las aulas de química y mi consideración de que su “teoricidad” es la característica clave más importante de todas.

Veamos esto con un poco más de detalle. Los modelos de la química son a partir de algo porque se realizan con el auxilio de ideas teóricas consensuadas que indican a los químicos y químicas qué representar y qué dejar de lado. Los modelos de la química son para determinadas comprensiones e intervenciones sobre el mundo sugeridas o dictadas por la teoría a la que ellos adhieren. Los modelos químicos son analogías de los sistemas que se pueden capturar y condensar en enunciados teóricos muy generales, abstractos y potentes. Los modelos químicos median para la aplicación de las teorías al mundo de la transformación de los materiales. Y, por último, la categoría de “modelo teórico” nos permite marcar similitudes y diferencias con otros tipos de modelos —mentales o icónicos, por ejemplo— que no aparecen cargados de las ideas científicas socialmente validadas que deben ser objeto de enseñanza. Así, los *modelos científicos (químicos) escolares* funcionarían, según la definición informal propuesta por Eichler (2001: 139; la traducción es mía), como “alguna cosa que promovería la unión entre la teoría científica y las propiedades inferidas de un sistema” que se ha seleccionado para su estudio en clase por su valor educativo.

## Referencias

- Adúriz-Bravo, A., *Una introducción a la naturaleza de la ciencia: La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica, 2005.
- Adúriz-Bravo, A., Hacia una didáctica de las ciencias experimentales basada en modelos. En: Álvarez, L., Rickenmann, R. y Vallès, J. (eds.), *II Congrés Internacional de Didàctiques: Llibre d'actes*, CD-ROM, n° 248, s/pp. Girona: Universitat de Girona, 2010.
- Adúriz-Bravo, A., Concepto de modelo científico: Una mira-

- da epistemológica de su evolución. En: Galagovsky, L. (coord.), *Didáctica de las ciencias naturales: El caso de los modelos científicos*, pp. 141-161. Buenos Aires: Lugar Editorial, 2011.
- Adúriz-Bravo, A., A 'semantic' view of scientific models for science education, *Science & Education*, en prensa.
- Chamizo, J. A., Los modelos de la química, *Educ. quím.*, 17(4), 476-482, 2006.
- Develaki, M., The model-based view of scientific theories and the structuring of school science programmes, *Science & Education*, 16(7), 725-749, 2007.
- Díez, J. A. y Moulines, U., *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona, Ariel, 2<sup>a</sup> edición, 1999.
- Duschl, R. A., *Renovar la enseñanza de las ciencias: Importancia de las teorías y su desarrollo*. Madrid: Narcea, 1997. (Original en inglés de 1990.)
- Eichler, M., Os modelos abstratos na apreensão da realidade química, *Educ. quím.*, 12(3), 138-148, 2001.
- Erduran, S. y Duschl, R. A., Interdisciplinary characterizations of models and the nature of chemical knowledge in the classroom, *Studies in Science Education*, 40(1), 105-138, 2004.
- Estany, A., *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Barcelona, Crítica, 1993.
- Gallego Badillo, R., Un concepto epistemológico de modelo para la didáctica de las ciencias experimentales, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), 301-319, 2004.
- Giere, R. N., *La explicación de la ciencia: Un acercamiento cognoscitivo*. México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1992. (Original en inglés de 1988.)
- Giere, R. N., Using models to represent reality. En: Magnani, L., Nersessian, N. J. y Thagard, P. (eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery*, pp. 41-57. Nueva York: Kluwer Academic Publishers/Plenum Press, 1999.
- Gilbert, J. y Boulter, C. (eds.), *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- Grandy, R., What are models and why do we need them?, *Science & Education*, 12(8), 773-777, 2003.
- Greca, I. M. y Moreira, M. A., Mental models, conceptual models, and modelling, *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11, 2000.
- Gutiérrez, R., La modelización y los procesos de enseñanza/aprendizaje, *Alambique*, 42, 8-18, 2004.
- Gutiérrez, R., Polisemia actual del concepto "modelo mental": Consecuencias para la investigación didáctica, *Investigações em Ensino de Ciências*, 10(2), 209-226, 2005.
- Halloun, I. A., *Modeling theory in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Harrison, A. G. y Treagust, D. F., A typology of school science models, *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026, 2000.
- Izquierdo-Aymerich, M., Un nuevo enfoque de la enseñanza de la química: Contextualizar y modelizar, *The Journal of the Argentine Chemical Society*, 92(4-6), 115-136, 2004.
- Izquierdo-Aymerich, M., Enseñar ciencias, una nueva ciencia, *Enseñanza de las Ciencias Sociales*, 6, 125-138, 2007.
- Izquierdo-Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A., Epistemological foundations of school science, *Science & Education*, 12(1), 27-43, 2003.
- Joshua, S. y Dupin, J.-J., *Introducción a la didáctica de las ciencias y la matemática*. Buenos Aires: Colihue, 2005. (Original en francés de 1993.)
- Justi, R., La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos, *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 173-184, 2006.
- Justi, R. y Gilbert, J. K., Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers, *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387, 2002.
- Khine, M. S. y Saleh, I. M. (eds.), *Models and modeling: Cognitive tools for scientific enquiry*. Dordrecht: Springer, 2011.
- Koponen, I. T., Models and modelling in physics education: A critical re-analysis of philosophical underpinnings and suggestions for revisions, *Science & Education*, 16(7-8), 751-773, 2007.
- Kuhn, T.S., Postscript. En: *The structure of scientific revolutions*, pp. 174-210. Chicago: University of Chicago Press, 2a edición, 1970.
- Lombardi, O., La noción de modelo en ciencias, *Educación en Ciencias*, 2(4), 5-13, 1998.
- Lorenzano, P., La teorización filosófica sobre la ciencia en el siglo XX, *Boletín de la Biblioteca del Congreso de la Nación*, 121, 29-43, 2001.
- Merino Rubilar, C. e Izquierdo-Aymerich, M., Aportes a la modelización según el cambio químico, *Educ. quím.*, 22(3), 212-223, 2011.
- Morrison, M. y Morgan, M. S., Models as mediating instruments. En: Morgan, M. S. y Morrison, M. (eds.), *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*, pp. 10-37. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Mosterín, J., *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial, 1984.
- Niaz, M., *Critical appraisal of physical science as a human enterprise: Dynamics of scientific progress*. Dordrecht: Springer, 2009.
- Oh, P. S. y Oh, S. J., What teachers of science need to know about models: An overview, *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130, 2011.
- Raviolo, A., Modelos, analogías y metáforas en la enseñanza de la química, *Educ. quím.*, 20(1), 55-60, 2009.
- Rosenberg, A., *Philosophy of science: A contemporary introduction*. Londres: Routledge, 2000.
- Schwarz, C. V. y Gwekwerere, Y. N., Using a guided inquiry and modeling instructional framework (EIMA) to support pre-service K-8 science teaching, *Science Education*, 91(1), 158-186, 2007.
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S. y Griggs, P., An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching, *Science Education*, 92(3), 424-446, 2008.