

Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las ciencias naturales

A model of scientific model for science teaching

Agustín Adúriz-Bravo^{1,2} y Mercè Izquierdo-Aymerich²

¹Grupo de Epistemología, Historia y Didáctica de las Ciencias Naturales (GEHyD), Centro de Formación e Investigación en Enseñanza de las Ciencias (CeFIEC), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad de Buenos Aires (UBA). CeFIEC, Planta Baja, Pabellón 2, Ciudad Universitaria, Avenida Intendente Güiraldes 2160, (C1428EGA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. E-mail: aadurizbravo@cefiec.fcen.uba.ar

²Departament de Didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, España

Resumen

Este trabajo revisa, desde la perspectiva de la didáctica de las ciencias naturales, la epistemología reciente y actual en busca de una concepción metateórica acerca de lo que es un modelo científico que tenga valor educativo y que sintonice con la posibilidad de diseñar una auténtica actividad científica escolar para las clases de ciencias naturales de primaria y secundaria. La concepción semántica de modelo, y en especial la idea de modelo teórico tal cual es propuesta por el epistemólogo estadounidense Ronald Giere, parecen adecuadas a la hora de hacer converger, en el aula de ciencias, el pensamiento teórico, el discurso con híbridos semióticos especializados y la intervención transformadora intencionada y valórica sobre el mundo natural.

Palabras clave: naturaleza de la ciencia, epistemología del siglo XX, modelo científico, concepción semántica, actividad científica escolar.

Abstract

This paper reviews, from the perspective of the discipline of science education ('didactics of science'), recent and current philosophy of science in order to find a meta-theoretical conception of what a scientific model is that has educational value and is tuned with the possibility of designing an authentic school scientific activity for primary and secondary science classes. The semantic conception of models, and especially the idea of theoretical model as proposed by the American philosopher of science Ronald Giere, seem adequate when fostering a convergence, in the science classroom, between theoretical thinking, discourse with specialised semiotic hybrids, and an intentional and value-laden intervention to transform the natural world.

Key-words: nature of science, 20th century philosophy of science, scientific models, semantic conception, school scientific activity.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando los profesores y profesoras de ciencias naturales nos hacemos conscientes de las decisiones a tomar en nuestro trabajo y queremos fundamentarlas, compararlas con las de otros profesores, establecer prioridades entre ellas, gestionarlas para llegar a los fines deseados y comunicarlas a nuestros colegas, encontramos que necesitamos de nuevos conocimientos (provenientes de la epistemología o filosofía de la ciencia, de la pedagogía, de la ciencia cognitiva, de la lingüística y de tantas otras disciplinas); esos conocimientos se “trenzan” con los de las disciplinas científicas a enseñar para diseñar una auténtica *actividad científica escolar* (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003) en nuestras clases. Podemos decir que esto es lo que constituye la didáctica de las ciencias naturales como ‘ciencia del profesorado de ciencias’ (Izquierdo-Aymerich, 2005): una manera *teórica* de mirar la actividad científica a fin de configurar una propuesta para enseñarla significativamente a diversas audiencias. La didáctica de las ciencias es entonces una disciplina científica para el diseño de una *ciencia que se aprende* (Izquierdo-Aymerich, 2007).

Desde esta concepción de didáctica de las ciencias nos resulta importante ir a la epistemología para “dar cuerpo” a las ideas acerca de la *naturaleza de la ciencia* que queremos hacer vivir en nuestras aulas (Adúriz-Bravo, 2005). El objeto de este trabajo es, pues, recuperar una concepción de los *modelos científicos* que a nuestro juicio puede ser interesante para la enseñanza de las ciencias naturales en las aulas de primaria y secundaria. Para ello exploraremos algunos desarrollos epistemológicos recientes y actuales en busca de pistas que iluminen la evolución conceptual que ha sufrido la idea de modelo desde el plano *metateórico* y seleccionaremos un ‘modelo de modelo’ que sintonice con nuestra propuesta de una actividad científica escolar epistemológicamente fundamentada (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003).

El término ‘modelo’ se emplea en el lenguaje natural con diversos significados; a veces con ‘modelo’ nos referimos a un objeto u evento del mundo real (el modelo de un pintor, por ejemplo) que es *representado* de alguna manera, mientras que otras veces llamamos ‘modelo’ a la *representación* simbólica (una maqueta, por ejemplo) que se hace de una entidad real. Así, podríamos clasificar los usos comunes de la idea de modelo en dos grandes apartados (Adúriz-Bravo, en prensa):

1. En el primero, el ‘modelo’ remite a un *arquetipo*, *ejemplo paradigmático* o *epítome* de una clase o conjunto; refiere a un *caso*, una *concreción* o una *instancia* representativas de una determinada situación más general o abstracta; evoca la idea de un *canon* a imitar o de unas *reglas de juego* a seguir.

2. En el segundo, ‘modelo’ remite a una *versión estilizada*, *réplica*, *esquema* o *diseño* de algo; señala una *imitación* o *simulación* de su referente, que sólo captura de manera simplificada algunos elementos centrales –elegidos según una determinada mirada *intencionada*– y que pasa por alto los detalles a fin de permitir un acercamiento más sencillo al entendimiento y la manipulación de lo que se está modelizando.

Esta polisemia del término ‘modelo’ puede no ocasionar demasiado “ruido” en la vida cotidiana, donde el contexto de uso indica a los hablantes cuáles de los múltiples sentidos y connotaciones es más apropiado entender, y donde cierta cuota de ambigüedad añade riqueza retórica al lenguaje. Sin embargo, en el campo de la naturaleza de la ciencia, esa misma riqueza constituye un obstáculo a la hora de aprehender el alcance de este concepto. En este sentido, intentar aproximarse a una definición de los constructos de teoría y de modelo sería una demanda conceptual aceptada en la epistemología (Mosterín, 1984; Estany, 1993) y muy necesaria también desde la didáctica de las ciencias naturales.

En efecto, los profesores y profesoras de ciencias naturales usamos en clase modelos científicos pragmáticamente adecuados –mediante la *transposición didáctica*– a nuestros estudiantes (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001; Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003). En la enseñanza de las ciencias naturales debemos echar mano a ideas metateóricas cuyo alcance está aún en discusión; por ello es deseable, en la línea de trabajo llamada ‘naturaleza de la ciencia’ que existe al interior de la disciplina didáctica de las ciencias naturales, establecer con claridad algún “punto de partida” que sirva al profesorado de ciencias. El presente artículo se fundamenta en esta necesidad: queremos llegar a la identificación de una postura metateórica reciente sobre la significación del término ‘modelo’ que tenga valor educativo y que nos sirva en la tarea de enseñar unas ciencias epistemológicamente fundamentadas. Para situar en su contexto este análisis que hacemos, nos remontamos también a un breve repaso histórico que dé sentido a las discusiones contemporáneas de la epistemología y de la didáctica en el campo de la modelización.

2. ¿A QUÉ SE LLAMA MODELO EN LAS CIENCIAS NATURALES?

En el lenguaje especializado, el término teórico ‘modelo’ (que es utilizado por los científicos naturales durante su labor diaria, por los epistemólogos que reflexionan metateóricamente sobre la naturaleza de tal labor, y por los didactas y profesores de ciencias que comunican contenidos concernientes a las dos actividades anteriores) está tomado del lenguaje natural, pero se lo ha redefinido de acuerdo al nuevo contexto *pragmático* en el que ahora opera (Estany, 1993; Gutiérrez, 2005). En general, en la investigación científica se emplea la idea de modelo para abarcar un “esquema *teórico* [...] de un sistema o de una realidad compleja [...] que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento” (Real Academia Española, 2008; el subrayado es nuestro), poniendo así énfasis en los aspectos más abstractos y simbólicos (‘mediados’) de la operación de modelización.

Sin embargo, esta especificación de sentidos realizada sobre el amplio abanico de acepciones (en la misma entrada del diccionario de la RAE citada más arriba se cuentan once distintas) no hace desaparecer de la ciencia la controversia acerca del concepto de modelo, que es, bien por el contrario, importante y aún no saldada (cf. Díez y Moulines, 1999; Gutiérrez, 2005). A este respecto, quizás el único rasgo común de la idea de modelo sobre el que acuerdan los científicos naturales, epistemólogos, didactas y profesores

de ciencias es el hecho de que el modelo es un *subrogado* (esto es, un sustituto) del sistema real bajo estudio (Adúriz-Bravo, en prensa). La complejidad de ese sistema, con numerosas componentes ricamente interrelacionadas, hace imposible abordarlo científicamente; por tanto, los científicos y científicas trabajan con *re-presentaciones* (“reemplazos en ausencia”) del sistema que solo retienen algunos elementos esenciales de interés. De allí esta consideración de que el modelo (tanto en su significado 1, *axiomático*, de ejemplo, como en su significado 2, *operacional*, de imitación) funciona como un *facilitador* para la comprensión del mundo real (Moreira et al., 2002).

Es debido al doble carácter del modelo –a la vez estructurante para la enseñanza de las ciencias naturales y debatido desde las distintas comunidades académicas– que creemos importante trazar en la historia de la ciencia la genealogía de las concepciones actuales, en especial de aquella hacia la cual nos volcamos desde nuestro *modelo de ciencia escolar* (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003).

Como primera aproximación, y antes de sumergirnos –en la siguiente sección– en un análisis de las divergencias de opinión en torno a los modelos, podemos decir que lo que caracteriza la actuación de los científicos y científicas naturales es la construcción de *teorías*. Las teorías científicas, si bien son provisorias y perfectibles, no resultan nunca arbitrarias, puesto que pretenden hablar del mundo. Lo que da sentido a la actividad científica de naturaleza teórica es la meta *epistémica* que se busca alcanzar: intervenir en los fenómenos, intentar comprenderlos y aprovecharlos para mejorar las condiciones de vida de la humanidad.

Las teorías son las representaciones específicas de la ciencia, lo más propio e importante de la actividad científica. Ellas están formadas por *modelos teóricos* y por *dominios de fenómenos*; entre modelos y fenómenos se establecen relaciones sustantivas que se desarrollan gracias a la formulación de hipótesis, que son contrastadas con la realidad para poder ser aceptadas. Los científicos elaboran modelos teóricos de manera creativa e imaginativa, para conseguir que muestren o sugieran las características “transversales” de determinadas agrupaciones de fenómenos (Lombardi, 1998; Izquierdo-Aymerich et al., 1999).

En este sentido, podemos afirmar que

[L]os *modelos teóricos* son (...) las entidades principales del conocimiento científico, siempre y cuando conecten con fenómenos y permitan pensar en ellos para poder actuar. (Izquierdo-Aymerich et al., 1999: 48; subrayado en el original)

3. DISTINTAS CONCEPTUALIZACIONES EPISTEMOLÓGICAS DE LA IDEA DE MODELO

Las primeras reflexiones “profesionalizadas” sobre la naturaleza de la ciencia, llevadas a cabo por el positivismo lógico durante la primera mitad del siglo XX, soslayaron la dicotomía entre los dos sentidos opuestos de modelo que

presentamos más arriba proponiendo que la peculiar especificidad de las ciencias naturales requeriría considerar el modelo como un caso en el seno de la teoría de la cual hace parte. Es decir, los positivistas lógicos tomaron los modelos de la física (la ciencia más estudiada por ellos) como los ‘ejemplos con contenido’ de la *estructura formal* provista por las proposiciones propias de las teorías físicas.

Con ello instauraron la llamada ‘visión basada en teorías’ (*theory-based view*), que situaba la teoría científica en el lugar protagónico y le otorgaba prioridad lógica sobre los modelos, que quedaban así como entidades *derivativas* de ella y, por tanto, jerárquicamente subordinadas (Adúriz-Bravo, en prensa). Es así que los primeros epistemólogos estudiaron la estructura de las teorías sin prestar demasiada atención a la naturaleza de los modelos científicos.

Después de la Segunda Guerra Mundial, los relatos epistemológicos neopositivistas continuaron con esta tendencia a separar los dos usos opuestos del término ‘modelo’, pero ahora suponiendo que las ciencias formales (matemática, lógica, informática) privilegiaban el primer uso, mientras que las ciencias naturales (física, química, biología, geología...) se decantaban por el segundo (Mosterín, 1984; Estany, 1993).

Así, para la epistemología formalista, el modelo matemático típico es modelo de una teoría en el sentido de que es un modelo *para* esa teoría. Esto es, se trata de un sistema que sirve a la hora de abstraer los principios básicos de esa teoría (llamados *axiomas*), o al menos resulta su concreción más paradigmática. Es decir, el modelo matemático es un “objeto” a tomar de ejemplo para construir *a partir de él* la teoría que lo representa o, en algunos casos, un ejemplo particularmente característico desprendido de la concretización (*interpretación*) de esa teoría. Utilizando esta primera acepción de modelo, los distintos *conjuntos numéricos* (naturales, racionales, reales...) son vistos como ejemplificaciones *modélicas* de estructuras abstractas sin contenido alguno, formuladas o no a partir de ellos.

Para este mismo grupo de autores, en cambio, el modelo físico típico es modelo de un sistema en el sentido de que es un modelo *desde* o *a partir de* ese sistema. Es su contraparte *representacional*, abstraída, simplificada y aproximada, que admite un tratamiento nomológico (“legaliforme”), muchas veces cuantitativo. A menudo, esta representación es soportada por un medio concreto (muchas veces con una fuerte componente visual), funcionando de este modo de representación manipulable. Así, según esta segunda acepción de modelo, un *péndulo simple* sería una masa sin dimensiones conectada a una cuerda “ideal”; al darle un empujón a esa masa, ella oscila sin detenerse, y en cada oscilación tarda siempre un mismo tiempo característico, llamado *período*. Por ello, este oscilador físico sería en cierto modo una “copia” de objetos reales más complejos (objetos que “pendulan”).

Distinguir conceptualmente entre los modelos matemáticos y físicos, sin embargo, no comporta llevarlos al centro de la discusión epistemológica. Para la llamada *concepción heredada*, en la posguerra, esa discusión seguía dominada por el estudio de las teorías. Por el contrario, algunos de los que podemos llamar ‘modelos epistemológicos actuales de

modelo', aquellos que a nuestro juicio revisten mayor interés para la didáctica de las ciencias naturales, reivindicando para este constructo su estatus de ser una clase fundamental entre las distintas representaciones científicas, que merece ser pensada a fondo. Además recuperan, a la hora de pensarlo, ambas significaciones de la etiqueta (*modelo-para* y *modelo-a-partir-de*), mostrando que pueden compatibilizarse entre sí y predicarse de las mismas entidades (Estany, 1993; Adúriz-Bravo, 2001).

Para la enseñanza de las ciencias naturales, queremos señalar que esta concepción híbrida de modelo científico entra en conflicto con las opiniones sobre qué son los modelos que muchos profesores y profesoras de ciencias naturales sostienen en sus clases; tales opiniones serían una versión restringida del modelo 2 (en el subtipo de maqueta o copia simplificada). En este sentido, parte del profesorado entiende el modelo como una *verdad* sobre el mundo, "calcada" a partir de él; a esta visión de ciencia se la puede calificar de *realismo ingenuo* o *icónico* (cf. Galagovsky, 2008).

4. RELACIONES ENTRE MODELOS Y TEORÍAS A LO LARGO DE LA HISTORIA

Recorreremos ahora brevemente tres formas históricas alternativas de entender qué es un modelo y cómo se relaciona con la teoría, que van a desembocar en una conceptualización actualmente válida que nos interesa para la enseñanza de las ciencias naturales. Tal conceptualización, si bien no es compartida por toda la comunidad epistemológica, es ciertamente central en esa disciplina y resulta además muy sugerente para la didáctica de las ciencias naturales (Gieryn, 1999a, 1999b; Izquierdo-Aymerich, 2000; Adúriz-Bravo, 2001, 2005; Develaki, 2007).

Resumidamente, podríamos decir que la idea de modelo fue cambiando, a lo largo de los años que van de 1920 a 1980, de la siguiente manera: inicialmente, el modelo constituyó un mero ejemplo de la teoría, luego pasó a ser una aplicación particularmente digna de imitar de esa teoría, y finalmente llegó a identificarse con un sistema que la teoría tiene intención de explicar en forma prioritaria (Adúriz-Bravo, en prensa).

Para la influyente concepción heredada de las teorías de las décadas del '50 y '60, que estudió a fondo los aspectos lógico-lingüísticos del conocimiento científico, las teorías empíricas de las ciencias fácticas son *cálculos interpretables*, en el sentido de la lógica formal (es decir, sistemas formales a los que se puede dar contenido). En este contexto, el modelo es una entidad menor: se trata nada más que de un sistema (una *estructura*) que *satisface* (cumple) los axiomas de la teoría científica, de la cual *pasa a ser modelo* tras este proceso de 'interpretación' (Díez y Moulines, 1999). Tomando un ejemplo bien conocido, podemos decir que, según esta visión de ciencia, el *Sistema Solar* sería un modelo de la mecánica clásica newtoniana, dado que se trata de un conjunto de cuerpos existentes que se mueven "gobernados" por las tres leyes de Newton. Evidentemente, este 'sistema' no son estrictamente *todos* los movimientos de *todos* los cuerpos en el espacio cercanos al Sol, sino un recorte aproximativo altamente estilizado.

Con la entrada en escena de la llamada *nueva filosofía de la ciencia* en las décadas del '60 y '70, Thomas Kuhn propone enfocar la atención en otro aspecto de la idea de modelo, central a fin de entender el funcionamiento de la actividad científica. Al intentar precisar su noción de *paradigma*, Kuhn propone el constructo de *ejemplar*, entendido como modelo científico "a imitar" en la búsqueda de nuevas soluciones a los problemas que van investigándose, soluciones inspiradas en esa solución canónica y fundacional que se sigue de cerca al hacer ciencia (Kuhn, 1999; Díez y Moulines, 1999; Galagovsky, 2008). En esta segunda concepción de modelo, la explicación de la oxidación del hierro sería un logro especialmente importante de la química de Lavoisier, que funciona como modelo al permitir arrojar luz o dar sentido a otros fenómenos similares que se están estudiando en esa misma época (Izquierdo-Aymerich, 2007).

Señalemos aquí que la aportación de Kuhn a la discusión sobre los modelos científicos pasó relativamente inadvertida hasta bien entrada la década del '80, debido al enorme revuelo intelectual provocado por las tesis de su libro de 1962, *La estructura de las revoluciones científicas*, en torno al papel que juegan los factores externalistas e "irracionales" en el cambio científico. Sin embargo, esa idea nuclear de modelo-ejemplar es recuperada hoy por su relevancia desde la epistemología y la didáctica de las ciencias *moderadamente realistas y racionalistas* (Adúriz-Bravo, 2005).

La *concepción semántica* de los años '70 y '80 es la última parada de nuestro recorrido histórico y constituye el germen del modelo actual de modelo que nos interesa para nuestro trabajo. Dentro de la familia semántica, y en especial para los miembros del llamado *programa estructuralista*, los modelos constituyen el centro de la *parte aplicativa* de una teoría y forman una *clase* (conjunto) que queda caracterizada por las *leyes* científicas (axiomas en sentido propio) de esa teoría (Moulines, 1982; Díez y Moulines, 1999; Lorenzano, 2008). En esta línea, los modelos son 'proyecciones' de la teoría al mundo, o sus *realizaciones posibles*; constituyen los *correlatos formales* ('teóricos') de los hechos reales que la teoría pretende explicar (Moulines, 1982).

Para esta tercera concepción, el modelo hecho sobre los "híbridos" de arveja con los que trabajaba Gregor Mendel pertenece a la clase de cosas de las cuales predica, o a las cuales se refiere, *intencionalmente* la genética clásica (Lorenzano, 2008). Es decir, esta planta es la que satisface las leyes planteadas y por tanto pasa a formar parte esencial –como *hecho interpretado*– del cuerpo de la teoría que luego se extenderá a nuevos seres vivos.

La visión semántica añade a la recuperada reconstrucción kuhniana de los modelos como "«casos» que han sido bien resueltos y que por ello son ejemplares" (Izquierdo-Aymerich, 2007: 132; subrayado en el original) el requerimiento más clásico de que

[t]odos pueden ser representados igual y formularse de manera que sea lo más abstracta posible [...]. [En los modelos, l]as entidades abstractas [...] son

imprescindibles para relacionar entre sí las intervenciones experimentales y comunicar los resultados de manera comprensiva [...]. (Izquierdo-Aymerich, 2007: 132; el subrayado es nuestro)

La pluralidad de marcos teóricos divergentes se da no solo a nivel de qué son los modelos científicos y cómo se relacionan con las teorías y la realidad, sino también en cuanto a cómo *clasificarlos*. Existen muy variadas tipologías soportadas en diversos criterios (cf. Gilbert y Boulter, 2000; Islas y Pesa, 2004; Adúriz-Bravo et al., 2005; Joshua y Dupin, 2005), a saber: 1. modelo interno, *mental*, versus modelo externo ‘expresado’ (epistémico, ubicado en lo que Karl Popper llama ‘mundo 3’); 2. modelo físico, analógico o teórico (de acuerdo con sus constituyentes últimos); 3. modelo histórico (perimido) versus modelo actual (vigente); 4. modelo personal (idiosincrásico) versus modelo consensuado (compartido); 5. modelo ‘sabio’ o ‘erudito’ (de los científicos) versus modelo pedagógico o didáctico (*transpuesto* para la enseñanza); y tantas otras.

5. LOS MODELOS TEÓRICOS SEGÚN LA CONCEPCIÓN SEMÁNTICA ACTUAL

Hoy en día, la concepción semántica, que introdujimos brevemente en la sección anterior, constituye una de las escuelas de la epistemología más desarrolladas, mejor instituidas y más académicamente sólidas. El nombre de esta escuela

se debe fundamentalmente al hecho de que *la misma formulación lingüística de la teoría pasa a segundo plano* y a que en semántica formal los términos “modelo” y “verdad” son conceptos semánticos por excelencia: son conceptos que tienen que ver con una relación entre mundo y teoría. Que la formulación lingüística sea secundaria significa que en una teoría entidades lingüísticas como los enunciados mismos (...) son sólo medios para expresar la teoría y, por tanto, no hacen parte de ella. (Guerrero Pino, 2000: 194-195; el subrayado es nuestro)

Dentro de la concepción semántica, destacan por derecho propio tres autores que se han ocupado *in extenso* de la cuestión de los modelos científicos; se trata de los estadounidenses Fred Suppe y Ronald Giere y el holandés Bas van Fraassen. Estos epistemólogos, si bien han ideado marcos teóricos bien distintos para concebir la naturaleza de la ciencia (cf. Estany, 1993; Díez y Moulines, 1999; Echeverría, 1999; Guerrero Pino, 2000), se acercan en algunos puntos que nos proporcionan la plataforma conceptual básica para pensar la categoría de modelo en el ámbito de la enseñanza de las ciencias naturales.

Esos puntos marcan “novedades” más o menos radicales respecto de las escuelas anteriores (incluso frente al estructuralismo, del cual estos autores serían herederos más o menos indirectos según el caso) y además constituyen la fundamentación de un *programa de investigación epistemológica* actualmente en plena vigencia. Las concepciones de modelo de Suppe, Giere y van Fraassen comparten, a nuestro juicio, las siguientes características valiosas para la enseñanza de las ciencias naturales (Adúriz-Bravo, en prensa):

1. El interés está puesto ahora en cómo las teorías científicas *dan sentido* al mundo sobre el que se aplican y cómo *cobran sentido* para quienes las están aplicando (los agentes *cognitivos*, que incluyen a aprendices y maestros), más que en la estructura lógica y lingüística estricta de cada teoría. Se prioriza un acercamiento semántico, pragmático y retórico (Adúriz-Bravo, 2001).

2. Las teorías no son *solo* los enunciados teóricos de los que aquellas están compuestas, sino que contienen *también* los hechos interpretados por ellas. Además, las teorías científicas no se reducen a un saber de naturaleza proposicional, sino que constituyen también un ‘saber-cómo’ (*know-how*) en torno a las explicaciones e intervenciones que se pueden *hacer* con ellas. Una teoría es, por tanto,

una familia de modelos, pero más que una simple suma de estos modelos, porque estos últimos están vinculados por relaciones lógicas y experimentales que aseguran cierta coherencia al conjunto. (Joshua y Dupin, 2005: 20-21; el subrayado es nuestro)

3. Las teorías quedan mejor determinadas y caracterizadas por sus respectivas clases de modelos; por tanto, resulta más relevante dedicarse a estudiar metateóricamente estos que aquella. Este tipo de aproximación se dice ‘basada en modelos’ (*model-based view*) o ‘modeloteórica’. El foco del utillaje epistemológico está ahora puesto en entender la naturaleza del modelo científico, más que en ubicar este dentro de una red teórica cerrada descrita mediante enunciados. En este sentido, los exponentes de la visión basada en modelos

creen que se puede demostrar que una reinterpretación de las teorías científicas como conjuntos de modelos es más exitosa para una comprensión de la teorización científica [...], y que puede proporcionar una imagen más satisfactoria de la relación entre las teorías científicas y el mundo real a causa del rol mediador de los modelos [...]. (Develaki, 2007: 729; la traducción es nuestra)

4. No hay una relación tan directa entre lo que decimos (proposiciones) y los fenómenos, sino que esa relación está *mediada* por los modelos en tanto *representaciones* no lingüísticas del mundo, representaciones que no son reducibles ni a enunciación ni a realidad, puesto que son ‘autónomas’ con relación a ambas (Justi, 2006).

5. Se toma “en pie de igualdad” las distintas formas lingüísticas con las que se pueden presentar los mismos modelos, sin presuponer la supremacía o prioridad de algunas (la axiomática, por ejemplo) por sobre otras. En este aspecto la visión basada en modelo es mucho más flexible que la epistemología precedente, al considerar como conocimiento teórico un saber no rígidamente formalizado que se puede expresar con muy distintos lenguajes:

[Los modelos abstractos] pueden ser una maqueta, un dibujo, un hecho ejemplar. [P]ueden presentarse de manera simple, destacando sólo lo esencial para que resulten explicativos. [P]ueden definirse de muchas

maneras diferentes [...]. (Izquierdo-Aymerich, 2007: 132)

6. UN MODELO DE MODELO PARA LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA ESCOLAR

En los últimos años estamos asistiendo a una sinergia muy potente entre la concepción semántica, los aportes de la visión basada en modelos, un enfoque ‘representacional’ de las teorías y el llamado *giro cognitivo* que se produce en todas las disciplinas científicas sociales (Díez y Moulines, 1999; Echeverría, 1999). En este dinámico espacio de trabajo, Giere da el nombre de *modelo teórico* a una entidad abstracta, no lingüística, que se comporta como lo “mandan” los enunciados o proposiciones –en cualquier sistema simbólico elegido– que definen esa entidad (Giere, 1992; Estany, 1993; Díez y Moulines, 1999; Echeverría, 1999; Adúriz-Bravo, 2001). Según Giere, los modelos –y no el ‘núcleo’ proposicional de la teoría– son lo que se presenta usualmente en los libros de texto universitarios destinados a formar a los nuevos científicos y científicas.

Para Giere, el modelo teórico se relaciona sustantivamente con dos elementos: 1. el conjunto –amplio y heterogéneo– de recursos ‘expresivos’ que sirve para definirlo; y 2. el sistema del mundo al cual viene a modelizar, con el cual mantiene una relación de “parecido de familia” que técnicamente se llama *similaridad*. Las denominadas ‘hipótesis teóricas’ son el vehículo del conocimiento científico para hacer *aserciones con contenido empírico* sobre la realidad: ellas afirman que el modelo se parece al sistema *en tales y cuales aspectos y con tales y cuales grados de ajuste*. Estas hipótesis son, por tanto, susceptibles de prueba y, consecuentemente, corroborables o refutables de manera parcial y aproximativa durante la investigación científica.

Giere se decanta entonces por una aproximación semántica a la idea de ‘teoría’, según la cual esta se caracteriza por el conjunto de sus modelos, que lo son porque comparten las mismas ‘reglas de juego’ (lo que se puede hacer y lo que no se puede hacer al intervenir en los fenómenos de acuerdo con la teoría) y una misma representación de lo que ocurre cuando se interviene en ellos. Los modelos de la teoría son similares entre sí y similares a ciertos conjuntos de fenómenos. El ajuste entre los aspectos del modelo y las características de los fenómenos se realiza mediante hipótesis teóricas que permiten contrastar las previsiones hechas desde el modelo con los resultados de intervenir activamente en el mundo.

La teoría adquiere significado en sus modelos *vinculados* a los fenómenos; las hipótesis teóricas van estableciendo las maneras de proceder y de argumentar en la intervención (experimental o de otro tipo) según la teoría “general”, que va adquiriendo significado práctico. Se establecen así conglomerados de modelos con diferentes grados de especificidad; estos modelos, conjuntamente con las hipótesis teóricas, constituyen la teoría desde esta nueva mirada.

Las hipótesis teóricas se pueden formular de la manera siguiente: ‘Si *este sistema fuera tal y como lo dice el modelo*, al hacer *esto* pasaría *aquello*’ (Izquierdo-Aymerich,

2004). Como que las hipótesis son empíricas, puede ser que sus previsiones acierten (cuando el hecho del mundo se comporta según el ‘modelo’) o que no lo hagan (en el caso contrario), con una gran cantidad de variedades “intermedias”.

Giere pone la mecánica clásica como ejemplo-epítome de teoría, puesto que con ella empiezan casi todos los libros de texto de física general. Ahora bien, si bien las ‘leyes del movimiento’ pueden considerarse los axiomas de la teoría, los libros no deducen teoremas a partir de ellas; no se detienen en discutir cuáles enunciados son postulados y cuáles son definiciones, ni el significado de que, según la segunda ley, la posición en el espacio sea doblemente diferenciable o de que tenga sentido hablar de velocidad y aceleración en un instante. Lo que hacen, en cambio, es pasar a una serie de capítulos basados en diferentes suposiciones sobre la forma funcional de la fuerza, ilustrando con un ejemplo cada una de las diferentes funciones seleccionadas: un cuerpo que cae (el problema de Galileo), una masa sometida a una fuerza restitutiva lineal (ley de Hooke), una masa con un resorte dentro de un medio viscoso (el oscilador armónico amortiguado), etc. Lo que resulta interesante es que los científicos y científicas autores de los libros *con los cuales la mecánica pasará a las nuevas generaciones* desarrollan la teoría teniendo ya en mente unas determinadas aplicaciones, las que se proponen como ejemplos-epítome, y por ello imponen desde el principio, al argumentar, unas determinadas condiciones iniciales (las reglas de juego).

Volviendo al caso del péndulo que tratamos más arriba (y que Giere desarrolla con detalle en su libro), el sistema bidireccional o tridimensional se reduce a un caso unidireccional mediante una aproximación que restringe las oscilaciones del péndulo a ángulos pequeños, con lo cual queda claro que la ecuación de movimiento del péndulo y la ley que se deriva de ella no se *deducen* de manera puramente matemática o lógica de las leyes de Newton; por tanto, la “ley del péndulo” no es una afirmación universal verdadera a propósito de todos los péndulos. Giere nos recuerda que unas leyes del movimiento que proporcionaran una descripción literalmente verdadera y exacta de hasta los fenómenos físicos más simples deberían de ser muchísimo más complicadas que eso (Giere, 1992; Izquierdo-Aymerich, 2004).

Según Giere, para la manera en que trabajan los científicos y científicas naturales, parece ser que la verdad exacta y literal de las leyes es lo de menos. Lo que importa es un grado suficiente de aproximación para el propósito que se persigue, cualquiera que este sea. Esta reflexión permite afirmar que cuando la ciencia dice que las leyes son afirmaciones generales ‘confirmadas’, se sabe perfectamente que lo que se está usando son aproximaciones; es más, que la idealización y la aproximación forman parte de la esencia de las ciencias empíricas. Siguiendo con el ejemplo, está claro que los y las estudiantes de física saben de que se está hablando y admiten que ningún péndulo real se mueve según indica la ley. Así, un péndulo (inexistente e imaginario) que realmente cumple con la ley-axioma es un ‘modelo teórico’ que muestra cómo pensar y actuar en el conjunto de sistemas reales que se mueven “a la manera” de ese

‘péndulo-modelo’. Esto es así porque el péndulo-modelo es similar a estos ‘péndulos-objetos’ que los lectores pueden identificar en el mundo.

La analogía a la que muchas veces se recurre para explicar esta concepción de modelo aquí descrita es la del *mapa*. Un mapa es una forma pensada o imaginada de “ver” un determinado terreno. El mapa se define mediante diversos recursos expresivos (colores, líneas, letras, símbolos...) y captura algunos aspectos del lugar real (relieve, hidrografía, clima, división política...) que han sido seleccionados por un interés determinado. El mapa no es *homomórfico* respecto de su original (por ejemplo, es bidimensional, y tiene colores arbitrarios y letras, a diferencia del terreno), sino similar o semejante a él. El mapa nos permite desempeñarnos con solvencia en ese terreno; de esa misma forma, *el modelo constituye una guía extremadamente potente para la intervención sobre el mundo* en el contexto de la actividad científica erudita y también –creemos– en la enseñanza de las ciencias naturales.

7. LOS MODELOS TEÓRICOS EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS NATURALES

Más allá de los detalles técnicos bastante sofisticados (ver Giere, 1992: capítulo 3), la concepción de Giere de un modelo científico es a la vez sencilla, amplia y extremadamente potente: cualquier representación subrogante, en cualquier medio simbólico, que permite pensar, hablar y actuar con rigor y profundidad sobre el sistema que se está estudiando, califica de modelo teórico: no solo los modelos altamente abstractos más elaborados, sino también las maquetas, las imágenes, las tablas, los grafos, las redes, las analogías... siempre que habiliten, a quien los usa, a describir, explicar, predecir e intervenir y no se reduzcan a meros “calcos” *fenomenológicos* del objeto subrogado.

Esta nueva definición de modelo abre un extraordinario espacio de juego para el trabajo en las aulas de ciencias naturales (Giere, 1999a, 1999b; Izquierdo-Aymerich, 2000; Adúriz-Bravo, 2001), puesto que reduce la pesada carga impuesta por los formalismos que supuestamente se han de seguir cuando se hace ciencia escolar. Es decir, ahora no es tan importante enseñar a repetir y a manipular enunciados compactos (por ejemplo, las leyes de Newton), sino poder pensar sobre ciertos hechos-clave reconstruidos teóricamente (la caída de una manzana, el balanceo de un candelabro, la frenada de una patineta, el impacto entre dos bolas de billar...) para dar sentido a los fenómenos del mundo que nos rodea (la gravitación, las oscilaciones, el movimiento, el choque...) que se nos muestran análogos a aquellos.

Cuando se comunica y se enseña el conocimiento científico las hipótesis teóricas ya han validado el modelo erudito a enseñar. Los fenómenos ya se explican en términos de ese modelo y de las entidades teóricas que han surgido en el proceso de ajuste; dejan de ser ‘mundo’ para pasar a ser parte del modelo teórico que es, a la vez, modelo *de una teoría* y modelo *para otros hechos similares* (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003; Izquierdo-Aymerich, 2004).

Entonces, otro elemento clave de la propuesta de Giere para nuestro modelo de ciencia escolar es que él considera que los modelos teóricos son, al mismo tiempo, modelos-a-partir-de y modelos-para (Giere, 1992). Constituyen la contraparte abstracta de los sistemas modelizados y son epítome para la creación de nuevos modelos más específicos o más generales que se vincularán significativamente con ellos. Es decir, el modelo de *célula* sería, en un sentido, la versión extremadamente esquemática de algo que se puede ver por el microscopio y, en otro sentido, un “plano” (en sentido arquitectónico) para orientar la descripción y la comprensión de los distintos tipos celulares (neuronas, hepatocitos, glóbulos blancos, células de la piel...).

Con esta concepción flexible en mente, resulta fácil pensar que, *en las clases de ciencias naturales*, algunos hechos sugerentes, mirados a través de una lente teórica, pasan a ser modelos de alguna idea estructurante y, a su vez, se constituyen en modelos para investigar nuevos hechos similares a los iniciales y bajo las mismas reglas de juego (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003).

8. LA MODELIZACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS NATURALES

Gallego Badillo (2004) señala que la *modelización* constituye una de las actividades científicas centrales. También en la didáctica de las ciencias la noción de modelización viene cobrando fuerza (Gilbert y Boulter, 2000; Erduran y Duschl, 2004; Gutiérrez, 2004). Ahora bien, ¿qué entendemos por ‘modelizar’ en el marco de nuestro modelo de ciencia escolar?

Consideremos primero cuatro significados de la idea de modelización en las ciencias naturales (Adúriz-Bravo, en prensa):

1. La modelización es el proceso de creación de modelos científicos originales, novedosos respecto del cuerpo de conocimiento establecido en un determinado momento histórico.
2. La modelización consiste en la construcción de argumentaciones en las que se *subsumen* los hechos científicos investigados bajo modelos disponibles que sean capaces de explicarlos o de dar cuenta de ellos.
3. La modelización supone el ajuste de los modelos establecidos a causa de la aparición de nuevos datos “anómalos” durante la investigación, como resultado del contraste por medio de las hipótesis teóricas.
4. La modelización contiene también el ‘ejercicio’ intelectual de aplicar modelos ya existentes a explicar hechos ya estudiados en un entorno de enseñanza y formación.

Por tanto, podríamos afirmar que hay modelización científica en todos los ‘contextos’ (Echeverría, 1995) de la actividad científica: *innovación, aplicación, evaluación y educación*. Por una parte, la ciencia elabora modelos teóricos más o menos innovadores para afrontar retos intelectuales (técnicamente, la *resolución de problemas científicos*); esos modelos pueden generarse a partir de los anteriores por analogía, combinación o refinamiento, pero

también pueden aparecer *ex novo*, y mediante los más complicados y sorprendentes mecanismos cognitivos (que incluyen el sueño, la iluminación y la intuición, el accidente o el hecho fortuito, la revelación...).

En segundo lugar, los modelos establecidos pueden aplicarse a la explicación de hechos problemáticos mediante elaborados razonamientos *abductivos* y *analógicos* que muestran que, de alguna manera, esos hechos a explicar “se parecen” a aquellos modelos que son candidatos hipotéticos a explicarlos (Adúriz-Bravo, 2005).

En tercer lugar, en este proceso de hacer inteligibles los hechos durante la investigación científica, nuevos fenómenos, observaciones y resultados, más y mejores datos empíricos, o conocimientos teóricos adicionales pueden obligar a hacer ajustes a los modelos aceptados, añadiéndoles detalles y mejorándolos sustantivamente.

Por último, en las aulas de ciencias naturales de primaria y secundaria, el procedimiento de vincular hechos y modelos, aunque trivial para la ciencia de los científicos, aparece ciertamente como *novedoso* para los estudiantes, sea que ellos reconstruyan, ayudados por el grupo clase, modelos científicos consensuados para iluminar cuestiones que se les presentan como intrigantes, o que pongan en acción los modelos que han aprendido para explicarse y explicar a otros ciertas cuestiones de interés.

9. ALGUNAS IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

En la enseñanza “tradicional” de las ciencias naturales, hoy puesta en jaque por la ingente producción de la didáctica, resulta todavía usual encontrar lo que más arriba llamamos concepción icónica de los modelos. Según esta concepción, el modelo científico es una “copia” (a escala, estática, simplificada, bidimensional o cualquier otra variante por el estilo) de aquello real que se está estudiando. Esta visión de la actividad científica es consecuencia de la fuerte impronta *empiriopositivista* en la educación, que promueve en clase una imagen empobrecida de la naturaleza de la ciencia (Fernández et al., 2005).

Ahora bien, el desplazamiento desde esta concepción basada en enunciados, claramente insuficiente, hacia una más adecuada y robusta visión *modeloteórica* se está dando también, aunque con cierto retraso, en la didáctica de las

REFERENCIAS

Adúriz-Bravo, A. (2001). *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. Bellaterra: UAB. Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de <http://www.tesisexarxa.net/TDX-1209102-142933>

Adúriz-Bravo, A. (2005). *Una introducción a la naturaleza de la ciencia: La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.

Adúriz-Bravo, A. (en prensa). ¿Qué es un modelo científico desde el modelo de ciencia actual?, en Galagovsky, L. (coord.). *Una pregunta clave en la enseñanza de ciencias*

ciencias naturales (Izquierdo-Aymerich, 2000; Erduran y Duschl, 2004; Develaki, 2007), al igual que en su momento se dio en la epistemología. En nuestra disciplina, las ideas de modelo científico y de modelización son ahora focos de reflexión y de trabajo, y toda esa producción académica ya está empezando a dar frutos en las prácticas concretas de enseñanza.

En opinión de diversos autores de nuestro campo (cf. Develaki, 2007), las aportaciones epistemológicas reseñadas en este artículo, sobre todo aquellas provenientes de la concepción semántica en su versión más “madura”, resultan enriquecedoras a la hora de enseñar algunos modelos científicos importantes y, al mismo tiempo, de reflexionar metateóricamente sobre la naturaleza de los modelos con nuestros estudiantes. Creemos que los “puntales” del programa semántico admiten una transposición significativa a la hora de diseñar una ciencia escolar más rica (Izquierdo-Aymerich, 2000).

De entre las diversas posturas que hemos revisado, el enfoque que Giere (1992) sostiene acerca de los modelos teóricos es, en nuestra opinión, el más sugerente. El marco teórico de Giere es, a la vez, suficientemente flexible y riguroso como para poder trabajar en clase con *modelos científicos escolares* que genuinamente sirvan para entender el funcionamiento del mundo natural mediante ideas abstractas y, al mismo tiempo, no se encuentren tan alejados de las concepciones alternativas que traen los niños y niñas, adolescentes y jóvenes a la escuela (Izquierdo-Aymerich, 2000).

Estructurar la actividad científica escolar alrededor de modelos teóricos permitiría recrear en clase un saber disciplinar que es patrimonio de todos y todas, pero que se debería enseñar sólo en tanto que posibilite que los sujetos *comprendan* el funcionamiento del mundo natural (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003). Esta recreación, auxiliada por el profesorado y por los textos, no se plantea entonces como un ‘redescubrimiento’ de ideas complejas que llevaron siglos de arduo trabajo a la humanidad, sino como una apropiación –profundamente constructiva– de potentísimas herramientas intelectuales que se van representando en el aula con el nivel de formalidad necesario para cada problema y cada momento del aprendizaje.

naturales: ¿Son los modelos científicos verdades sobre la naturaleza?, capítulo 4. Buenos Aires: Biblos.

Adúriz-Bravo, A.; Garófalo, J.; Greco, M. y Galagovsky, L. (2005). Modelo didáctico analógico: Marco teórico y ejemplos. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra VII Congreso. Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de http://ensciencias.uab.es/webblues/www/congres2005/material/Simposios/04_Generar_resolver_sit/Aduriz_290A.pdf

Develaki, M. (2007). The model-based view of scientific theories and the structuring of school science programmes. *Science & Education*, 16(7), 725-749.

- Díez, J.A. y Moulines, U. (1999). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona: Ariel. 2ª edición.
- Echeverría, J. (1995). *Filosofía de la ciencia*. Madrid: Akal.
- Echeverría, J. (1999). *Introducción a la metodología de la ciencia: La filosofía de la ciencia en el siglo XX*. Madrid: Cátedra.
- Erduran, S. y Duschl, R. (2004). Interdisciplinary characterizations of models and the nature of chemical knowledge in the classroom. *Studies in Science Education*, 40, 111-144.
- Estany, A. (1993). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Barcelona: Crítica.
- Fernández, I., Gil-Pérez, D., Valdés, P. y Vilches, A. (2005). La superación de las visiones deformadas de la ciencia y la tecnología: Un requisito esencial para la renovación de la educación científica, en Gil-Pérez, D., Macedo, B., Martínez Torregrosa, J., Sifredo, C., Valdés, P. y Vilches, A. (eds.). *¿Cómo promover el interés por la cultura científica?: Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años*, 29-62. Santiago: OREALC-UNESCO.
- Galagovsky, L. (coord.) (2008). *¿Qué tienen de "naturales" las ciencias naturales?* Buenos Aires: Biblos.
- Galagovsky, L. y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales: El concepto de *modelo didáctico analógico*. *Enseñanza de las Ciencias*, 19(2), 231-242.
- Gallego Badillo, R. (2004). Un concepto epistemológico de modelo para la didáctica de las ciencias experimentales. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(3). Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de http://saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen3/Numero3/ART4_VOL3_N3.pdf
- Giere, R. (1992). *La explicación de la ciencia: Un acercamiento cognoscitivo*. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Original en inglés de 1988.
- Giere, R. (1999a). Del realismo constructivo al realismo perspectivo. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra, 9-13.
- Giere, R. (1999b). Un nuevo marco para enseñar el razonamiento científico. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra, 63-70.
- Gilbert, J. y Boulter, C. (eds.) (2000). *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer.
- Guerrero Pino, G. (2000). Determinismo, modelos y modalidades. *Revista de Filosofía*, tercera época, XIII(24), 191-216.
- Gutiérrez, R. (2004). La modelización y los procesos de enseñanza/aprendizaje. *Alambique*, 42, 8-18.
- Gutiérrez, R. (2005). Polisemia actual del concepto "modelo mental": Consecuencias para la investigación didáctica. *Investigações em Ensino de Ciências*, 10(2), 209-226. Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol10/n2/v10_n2_a4.htm
- Hempel, C. (1989). *Filosofía de la ciencia natural*. Madrid: Alianza Editorial. 12ª edición. Original en inglés de 1966.
- Islas, S.M. y Pesa, M. (2004). Estudio comparativo sobre concepciones de modelo científico detectadas en Física. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, XV(29), 117-144.
- Izquierdo-Aymerich, M. (2000). Fundamentos epistemológicos, en Perales, F.J. y Cañal, P. (comps.). *Didáctica de las ciencias experimentales: Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias*, 35-64. Alcoy: Marfil.
- Izquierdo-Aymerich, M. (2004). Un nuevo enfoque de la enseñanza de la química: Contextualizar y modelizar. *The Journal of the Argentine Chemical Society*, 92(4-6), 115-136.
- Izquierdo-Aymerich, M. (2005). Nuevos contenidos para una nueva época: Aportaciones de la didáctica de las ciencias al diseño de las nuevas 'ciencias para la ciudadanía', en *Anais do XVI SNEF 2005*. Río de Janeiro: Sociedade Brasileira de Física. Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de [http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/Nuevos contenidosmerce.pdf](http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/cd/Nuevos%20contenidosmerce.pdf)
- Izquierdo-Aymerich, M. (2007). Enseñar ciencias, una nueva ciencia. *Enseñanza de las Ciencias Sociales*, 6, 125-138.
- Izquierdo-Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science & Education*, 12(1), 27-43.
- Izquierdo-Aymerich, M., Sanmartí, N. y Espinet, M. (1999). Fundamentación y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 45-59.
- Joshua, S. y Dupin, J.J. (2005). *Introducción a la didáctica de las ciencias y la matemática*. Buenos Aires: Colihue. Original en francés de 1993.
- Justi, R. (2006). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 173-184.
- Kuhn, T. (1999). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica. 15ª reimpresión. Original en inglés de 1962.
- Lombardi, O. (1998). La noción de modelo en ciencias. *Educación en Ciencias*, 2(4), 5-13.
- Lorenzano, P. (2008). Incommensurability theoretical and comparability empirical: The case of classical genetics. Documento interno. Bernal: UNQui.

Moreira, M.A.; Greca, I.M. y Rodríguez Palmero, M.L. (2002). Modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 2(3), 37-57.

Mosterín, J. (1984). *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial.

Moulines, U. (1982). *Exploraciones metacientíficas: Estructura, desarrollo y contenido de la ciencia*. Madrid: Alianza Editorial.

Real Academia Española (2008). *Diccionario de la lengua española*. 22ª edición. Madrid: RAE. Recuperado el 1 de noviembre de 2008 de http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=modelo