

**MODELOS MENTALES Y MODELOS CONCEPTUALES EN LA
ENSEÑANZA & APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS^{1,2}**
(Mental models and conceptual models in the teaching & learning of science)

Marco Antonio Moreira
Ileana María Greca
Instituto de Física, UFRGS
Caixa Postal 15051, Campus
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

M^a Luz Rodríguez Palmero
I.B. Dr. Antonio González y González
C/Felipe del Castillo n° 15
Tejina, La Laguna, Sta. Cruz de Tenerife, España

Resumen

Los modelos mentales son análogos estructurales de estados de cosas, eventos u objetos, del mundo. Las personas operan cognitivamente con modelos mentales. Entender un sistema físico o un fenómeno natural, por ejemplo, implica tener un modelo mental del sistema que le permite a la persona que lo construye explicarlo y hacer previsiones con respecto a él. Los modelos conceptuales, por otro lado, son modelos proyectados por científicos, ingenieros, profesores, para facilitar la comprensión y la enseñanza de sistemas físicos o de fenómenos naturales. Es decir, profesores y alumnos trabajan con modelos mentales, pero intentan enseñar y aprender modelos conceptuales. Los científicos, en general, diseñan modelos conceptuales, pero lo hacen a través de sus modelos mentales. Desafortunadamente, en la práctica, la relación entre modelos conceptuales y modelos mentales no es directa y simple, como se podría pensar, y eso tiene relevantes implicaciones para la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias Físicas y Naturales, así como para la investigación en enseñanza y en aprendizaje de las ciencias.

Palabras-clave: modelos mentales; modelos conceptuales; enseñanza de las ciencias.

Abstract

Mental models are structural analogues of state of affairs, events or objects, of the world. People operate cognitively with mental models. The understanding of a physical system, for instance, implies the construction of a mental model which provides for explanation and prediction regarding such a system. Conceptual models, on the other hand, are models designed by scientists, engineers, teachers in order to facilitate the understanding and the teaching of physical systems or natural phenomena. That is, teachers and students operate with mental models, but they try to teach and to learn conceptual models. Scientists, in general, design conceptual models, however, they do it through their mental models. Unfortunately, in practice, the relationship between conceptual models and mental models is

¹ Conferencia dictada en los XX Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales, La Laguna, Tenerife, 08 al 11 de septiembre de 2002.

² Publicado na Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 37-57, 2002.

not direct and simple as we could think and this has relevant implications for the teaching and learning of physical and natural sciences, as well as for research in science education.

Keywords: mental models; conceptual models; science teaching.

Introducción

Hoy se asume que no aprehendemos el mundo directamente, sino que lo hacemos a partir de las representaciones que de ese mundo construimos en nuestras mentes. A su vez, las teorías científicas, en la medida en la que son estructuras representacionales, que describen determinados estados de cosas en un mundo “ideal” (en el sentido en que no se refiere a una realidad concreta, aunque pueda aplicarse a ella), serán representadas, recreadas internamente por quien las comprende de una forma que no es necesariamente copia ni de las expresiones lingüísticas de sus principios, leyes y definiciones, ni de las formulaciones matemáticas con las cuales las teorías se representan externamente. Desde esta perspectiva, nuestros alumnos no son pasivos recipientes de información sino activos constructores de su conocimiento, de tal manera que aprender Ciencias significativamente implica que sean capaces de recrear esas teorías en sistemas de representación internos de conceptos relacionados, y no como simples listas de hechos y fórmulas, que es lo habitual en los materiales curriculares y en las aulas de ciencias.

El estudio de la estructura y del contenido de esas formas representacionales con las cuales internamente nuestros alumnos representan los conceptos científicos se ha convertido en un núcleo importante de investigación. El interés por su análisis ha surgido de dos disciplinas de investigación diferentes: la Psicología Cognitiva y la Didáctica de las Ciencias. Desde la Psicología Cognitiva, se ha planteado que las teorías de desarrollo conceptual, desenvueltas en su ámbito, eran insatisfactorias pues partían de conceptuaciones equivocadas del cambio y, también, por la utilización de métodos inadecuados para su estudio. Desde las investigaciones en Didáctica de las Ciencias, los resultados de un número expresivo de estudios sobre prácticas instruccionales para lograr que los alumnos adoptasen los conocimientos científicamente compartidos, o sea, el llamado cambio conceptual, demuestran que a pesar de los esfuerzos realizados aún no se ha alcanzado ese objetivo (Duit, 1993). Estas críticas han llevado a una revisión de los conceptos definidores de las dos vertientes y a un acercamiento entre ambas. Se supone ahora que el estudio de las representaciones internas nos puede permitir entender mejor los procesos de construcción, evolución y cambio de esas representaciones, y encarar entonces, desde el punto de vista educacional, la tarea de la facilitación del aprendizaje significativo en Ciencias.

De las varias formas representacionales propuestas por la Psicología Cognitiva, el constructo *modelo mental* (conjuntamente con los conceptos de modelo conceptual y modelización) es el que ha recibido la preferencia de los investigadores en enseñanza de las Ciencias, tal como puede observarse a partir del número creciente de artículos que a ese respecto están siendo publicados en las principales revistas del área (Krapas et al., 1997).

En este trabajo pretendemos enfocar la teoría de los modelos mentales y su relación con los modelos conceptuales y la modelización en Ciencias. Destacaremos también las posibles aportaciones que esta línea de investigación puede realizar a dos vertientes indispensables para la mejora y la actualización en la enseñanza de las Ciencias: la vertiente curricular e instruccional y la centrada en la investigación.

Modelos mentales, proposiciones e imágenes

En 1983 fueron publicados dos libros sobre modelos mentales, uno escrito por Philip Johnson-Laird, que propone una teoría de modelos mentales y otro editado por D. Gentner y A.L. Stevens, que se centra en el conocimiento que las personas desarrollan sobre fenómenos físicos y especialmente sobre dispositivos mecánicos y tecnológicos, sin presentar ninguna teoría unificada al respecto.

Hoy el término modelo mental aparece cada vez más en los artículos de investigación en enseñanza de las Ciencias y de la Física en particular. Sin embargo, aparecen también distintas interpretaciones de lo que es un modelo mental, incluyendo las conocidas preconcepciones y teorías “ingenuas” de los alumnos. El concepto de modelo mental que vamos a presentar aquí es el que propone Johnson-Laird (1983). Sin embargo, para introducirlo es necesario empezar con el concepto de representación.

Una *representación* es cualquier notación, signo o conjunto de símbolos que representa alguna cosa que es típicamente algún aspecto del mundo exterior o de nuestro mundo interior (o sea, de nuestra imaginación) en su ausencia. La palabra muñeca o el dibujo de una muñeca son representaciones externas que nos permiten evocar el objeto muñeca en su ausencia.

Las *representaciones mentales* son representaciones internas. Son maneras de “re-presentar” internamente (es decir, mentalmente), de volver a presentar en nuestras mentes, el mundo externo.

Se puede distinguir entre representaciones mentales analógicas y proposicionales. La imagen visual es la representación analógica prototípica, pero hay otras como las auditivas, olfativas o táctiles. El perfume de una rosa puede ser evocado a través de una imagen olfativa, lo que significaría que estaría internamente representado por una imagen olfativa también en nuestras mentes. Las imágenes son representaciones mentales concretas, formas de “ver” las cosas, los fenómenos, a las que se recurre para recuperar y captar la esencia de las mismas, cuanto menos, los detalles que han resultado relevantes al individuo que las construye.

Las representaciones proposicionales son “tipo-lenguaje”, pero un lenguaje de la mente, no consciente, que se podría llamar “mentalés”; no son frases en un cierto idioma. Independientemente del lenguaje estarían expresadas en un “código de máquina” propio de la mente. Este “mentalés” sería el equivalente de las cadenas de unos y ceros, relacionados por las reglas del álgebra booleana que constituyen el código de máquina de nuestros ordenadores. Las representaciones mentales proposicionales son discretas (individuales), organizadas por reglas de combinación (las reglas del mentalés) y abstractas; una proposición admite más de una representación posible (una frase, un principio, un discurso se representa de diferentes maneras en distintas personas) y ello, lógicamente, tiene consecuencias en la enseñanza.

A pesar de esta distinción, existe una polémica en la literatura respecto a si es cierta o no. Para unos (e.g., Pylyshyn, 1973), la cognición debe ser analizada exclusivamente en términos de proposiciones y no hay necesidad de considerar las imágenes como un tipo especial de representación mental : todo aquello con lo cual nuestra mente se maneja para pensar, comprender, explicar, recordar, puede ser traducido en el código del lenguaje de la mente. Es decir, las imágenes también serían procesadas en el “mentalés”. Para otros (e.g.,

Paivio, 1971), las imágenes tienen identidad, son un tipo separado de representación interna, tanto es así que se pueden trasladar y rotar mentalmente. Para éstos, la cognición no puede ser reducida al mentalés, sino que postulan que existen otras clases de informaciones, como las relacionadas con cuestiones geométricas, que necesariamente deberían ser procesadas en otro formato.

Johnson-Laird propone una tercera alternativa, una tercera forma de constructo representacional: los *modelos mentales*. Este autor postuló en un principio al menos tres tipos de representaciones mentales: *representaciones proposicionales* (cadenas de símbolos), *modelos mentales* (análogos estructurales del mundo) e *imágenes* (perspectivas de un modelo mental), todas ellas necesarias para poder explicar las maneras en las que las personas razonan, hacen inferencias, comprenden lo que los otros hablan y entienden el mundo.

Examinemos cada una de esas categorías de representaciones, en la óptica de Johnson-Laird.

Las *representaciones proposicionales* no están formadas por palabras; sin embargo, captan el contenido abstracto, ideativo de la mente que estaría expresado en esa especie de lenguaje universal de la mente, que es el mentalés. Es decir, por ejemplo, las frases “el libro está sobre la mesa”, “the book is on the table” y “le livre est sùr la table” no estarían expresadas así mentalmente.

No obstante, dichas representaciones son susceptibles de ser expresadas verbalmente.

Los *modelos mentales* son análogos estructurales del mundo; su estructura, y no su aspecto, corresponde a la estructura de la situación que representan.

Un modelo mental *representa* un estado de cosas, y consecuentemente su estructura no es arbitraria, tal y como lo es la de una representación proposicional (por ejemplo, la frase anterior, “el libro está sobre la mesa”, puede referirse a cualquier libro, abierto, cerrado, nuevo, viejo, sobre cualquier mesa, en la medida en que es abstracta y puede representarse de maneras diversas); el modelo mental desempeña un papel representacional analógico estructural y directo. Su estructura refleja aspectos relevantes del estado de cosas correspondiente en el mundo real o imaginario.

Una representación proposicional es una descripción que, en último término, es verdadera o falsa respecto al mundo. Pero los seres humanos *no* aprehenden directamente el mundo; tan sólo poseen una representación interiorizada de él. Por consiguiente, una representación proposicional es verdadera o falsa con respecto a un modelo mental del mundo que permite que pueda interpretarse.

Dichos modelos pueden ser básicamente analógicos (i.e., basados principalmente en imágenes), básicamente proposicionales o parcialmente analógicos y parcialmente proposicionales.

A diferencia de las representaciones proposicionales, los modelos mentales no tienen estructura sintáctica; su estructura es análoga a la que tienen los estados de cosas del mundo, tal como los percibimos o concebimos. Así, los modelos mentales, por su carácter dimensional, pueden ser manipulados más libremente, de manera controlada sólo por las propias dimensiones del modelo. Los modelos mentales pueden tener dos o tres dimensiones,

pueden ser dinámicos e, incluso, pueden tener un número mayor de dimensiones en el caso de determinados individuos con talento. Un modelo mental de un molécula de grafito puede tener dos o tres dimensiones, y puede ser dinámico, permitiéndole al sujeto explorar, por ejemplo, las deformaciones que sufre el material cuando es afectado por altas presiones. Un modelo mental de célula puede representarla en el plano o con volumen y puede atribuirle su funcionamiento característico o sólo abordar y dar cuenta de su estructura. Por el contrario, las representaciones proposicionales pueden ser exploradas solamente en las direcciones permitidas por la sintaxis y por las codificaciones propias de estas representaciones.

Las *imágenes*, para Johnson-Laird son producto tanto de la percepción como de la imaginación. Representan aspectos perceptibles de los objetos correspondientes en el mundo real. En un primer momento correspondían para el autor a vistas concretas de un modelo mental subyacente, a visiones relevantes o “visuales” del mismo; pero en un trabajo más reciente el propio Johnson-Laird (1996) revisa esta idea diferenciando las imágenes de los modelos mentales y no considerándolas solamente como vistas de un modelo mental que actúe como sustrato. *‘Las imágenes representan cómo algunas cosas son vistas desde un punto de vista particular’* (Johnson-Laird, 1996, p 124) y no suponen necesariamente la construcción o la posesión de un modelo mental explicativo y predictivo del que deriven. Esta revisión parece pertinente y quizás un ejemplo claro pueda ser el concepto “célula” para el que muchos estudiantes generan una imagen simple, estática, “huevo frito”, que opera en sus mentes de manera aislada, proposicionalmente, pero a la que no le atribuyen ningún sentido, ningún significado, no suponiendo su posesión la construcción de un modelo mental subyacente como análogo de lo que una célula es conceptualmente.

Las imágenes, así como los modelos mentales, son altamente específicas. Por ejemplo, no se puede formar una imagen de un plano inclinado en general, sólo de planos inclinados específicos. Sin embargo, si existiera un modelo subyacente, éste tendría todas las relaciones necesarias para definir plano inclinado y decidir si alguna figura o alguna afirmación respecto a ello es verdadera o falsa.

También las imágenes son susceptibles de continuas transformaciones, tales como rotaciones, traslaciones o expansiones. Lo que Johnson-Laird nos dice al revisar este concepto es que algunas personas razonan con ellas, usándolas en sus modelos mentales, pero no todas y no necesariamente supone una mayor eficacia en los procesos de razonamiento, aunque parece haber ciertos indicios de ello.

Resumiendo, en la perspectiva de Johnson-Laird, *representaciones proposicionales son cadenas de símbolos que corresponden al lenguaje natural, modelos mentales son análogos estructurales del mundo e imágenes son modelos vistos de un determinado punto de vista* (1983, p. 165). Y su revisión posterior: *“Las imágenes visuales eran un caso especial de modelos mentales, ahora parecen ser distintas clases de representación reclamadas por diferentes tipos de procesos”* (Johnson-Laird, 1996, p. 92).

Por ejemplo, la situación “el condensador está cargado” podría ser representada mentalmente como una proposición (porque es verbalmente expresable), como un modelo mental (de cualquier capacitor con una carga cualquiera, posiblemente prototípicos) o como una imagen (de un capacitor en particular con una cierta cantidad de carga). “Los seres vivos se nutren” puede ser una simple proposición o frase, se puede representar como un modelo mental que atribuya significado a dicho fenómeno o como un animal concreto cualquiera - ¡más frecuentemente que un vegetal!- que esté comiendo.

Los modelos mentales, las imágenes y las representaciones proposicionales pueden ser diferenciados no sólo a nivel estructural – tal como ha sido indicado hasta ahora – sino también a nivel funcional. Según Johnson-Laird, los modelos mentales y las imágenes son representaciones de alto nivel, esenciales para el entendimiento de la cognición humana. Aunque en su nivel básico el cerebro humano pueda computar las imágenes y los modelos en algún código proposicional (el “mentalés”), el uso de modelos e imágenes libera la cognición humana de la obligación de operar proposicionalmente en “código de máquina”. Dichas representaciones de alto nivel pueden compararse con los lenguajes de programación de ordenadores. En un último análisis, el ordenador trabaja en un código binario, pero el programador no: él/ella usa lenguajes de alto nivel que le permiten pensar sobre lo que tiene que hacer el ordenador utilizando el código binario. Los lenguajes de programación de alto nivel son traducidos por los ordenadores en código binario cuando son compilados. Análogamente, las imágenes y los modelos mentales serían traducidos por la mente en algún código proposicional propio, que correspondería al código de ceros y unos del ordenador. La metáfora del ordenador, la mente como un sistema de cómputo, es básica en Psicología Cognitiva, pero eso *no significa* que la mente opere también en un código binario. (¡Las metáforas tienen sus peligros!). La mente tiene su código propio, el “mentalés”, que no es consciente, al cual no tenemos acceso ni necesitamos tenerlo pues operamos muy bien con proposiciones, imágenes y modelos mentales, todos en el sentido de Johnson-Laird (Moreira, 1997, 195).

A continuación enfocaremos algunos aspectos de los modelos mentales, desde la misma perspectiva, que aún no se han tratado y merecen ser destacados.

Modelos mentales

Johnson-Laird plantea que en lugar de una lógica mental -- tal como se ha propuesto por distintas escuelas psicológicas, como, por ejemplo, la piagetiana -- las personas utilizan modelos mentales para razonar. Éstos son como bloques cognitivos que pueden ser combinados o recombinados conforme sea necesario. El aspecto esencial del razonamiento a través de modelos está no sólo en la construcción de modelos adecuados para captar distintos estados de cosas sino también en la habilidad para probar cualesquiera conclusiones a las que se llegue usándolos. La lógica, si es que aparece en algún sitio, no está en su construcción, sino en el ensayo de las conclusiones pues esto implica que el sujeto sepa apreciar la importancia lógica de falsear una conclusión y no sólo buscar evidencia positiva que la apoye (Hampson y Morris, 1996, p. 243).

Los razonamientos que involucran solamente un modelo mental pueden ser resueltos rápida y correctamente. Sin embargo, es muy difícil sacar conclusiones precisas basadas en premisas que pueden ser representadas por muchos modelos alternativos debido a la gran demanda que este proceso exigiría sobre la memoria de trabajo (Esto permite explicar, por ejemplo, gran parte de los errores que los sujetos cometen cuando son enfrentados con tareas que implican silogismos).

En el caso de la necesidad de construcción de modelos alternativos, el sujeto debe mantener en la memoria de trabajo cada uno de los varios modelos para sacar o verificar una conclusión (Sternberg, 1996, p. 410). Bajo esta perspectiva, el razonamiento deductivo es

mejor interpretado como una destreza que como una habilidad esotérica, abstracta . Por otro lado, una manera de contornar esa limitación de la memoria de trabajo es representar la información implícitamente, compactándola al máximo posible. Pero a una información así compactada no es posible aplicarle las reglas de la lógica formal, pues el razonamiento lógico exige que todas las premisas estén explicitadas. Por esto la teoría de los modelos mentales es una alternativa a las teorías sobre el razonamiento humano, dando cuenta, por ejemplo, de los casos en los que las personas razonan eficientemente en situaciones donde la información aparece en gran medida de forma implícita.

Los modelos mentales son finitos en tamaño y no pueden representar directamente un dominio infinito. No obstante, un único modelo mental puede representar un número infinito de posibles estados de cosas pues ese modelo puede ser revisado recursivamente. Cada nueva aserción descriptiva de un estado de cosas puede implicar revisión del modelo para incorporarla. Esta característica de los modelos mentales se refiere principalmente a los modelos construidos a partir del discurso pues éste es siempre indeterminado y compatible con muchos estados de cosas diferentes; para perfilar eso la mente construye un modelo inicial y lo revisa recursivamente conforme sea necesario. Naturalmente hay límites para esa revisión: en último análisis, el proceso de revisión recursiva es gobernado por las condiciones de verdad del discurso en el que el modelo está basado (Johnson-Laird, 1983, p. 408). O sea, los modelos mentales que el sujeto genera serán revisados en tanto no entren en conflicto con el valor de verdad que el individuo le asigna al discurso.

Los modelos mentales se componen de *elementos y relaciones* que representan de manera análogo-estructural un estado de cosas específico. Las estructuras de los modelos mentales son idénticas a las estructuras de los estados de cosas, percibidos o concebidos, que los modelos representan. Cada elemento de un modelo mental, y cada relación estructural, debe tener un papel simbólico. No debe haber en el modelo ningún aspecto sin función o significado (op. cit. p. 419). Esta propiedad de ser análogo-estructural permite que frente a una determinada situación, los elementos que son elegidos para interpretarla, así como las relaciones percibidas o concebidas entre ellos, determinen una representación interna que actúa como sustituto de esa situación. Al manipular internamente esos sustitutos, ciertas propiedades del sistema, así como las relaciones no explícitas entre sus componentes pueden ser “leídas”(inferidas) directamente.

Por ejemplo, si un alumno construye un modelo mental de un péndulo, en este modelo debe haber algún elemento, alguna entidad mental, que represente el hilo y otro que represente la masa; con estos elementos genera un “sustituto”. Además, deben existir relaciones causales del tipo “si-entonces” que le permiten “ejecutar” el modelo y hacer previsiones respecto al funcionamiento del péndulo. Para representar la dinámica litosférica del planeta, habremos de tener elementos que representen las placas tectónicas, así como aquéllos que suponen los fenómenos que se producen en sus bordes (dorsales, volcanes, zonas de subducción, ...) junto con las relaciones e interacciones que entre ellas se producen, relaciones que son causales y que permiten a la persona que construye un modelo semejante predecir su comportamiento futuro.

Esta clase de modelo causal fue propuesta por de Kleer y Brown (1983) para contestar la siguiente pregunta: ¿qué necesita un sistema cognitivo que se encuentra con un sistema físico (como un dispositivo hidráulico, eléctrico o térmico) para ir desde cómo está hecho el sistema hasta una o más posibilidades sobre su funcionamiento, suficientemente buenas para explicar lo que hace dicho sistema?

El proceso puede ser analizado en cuatro etapas:

0. representar el sistema (su topología, su estructura);
0. “visionar” el sistema (desde la estructura, visualizar cómo podría funcionar el sistema); el resultado de esta etapa es el modelo causal;
0. ejecutar el modelo (imaginar el modelo funcionando; simulación mental);
0. comparar con la realidad los resultados imaginados del modelo.

Dichas etapas son repetidas si la última no es satisfactoria. (Los modelos mentales son recursivos.)

Por ejemplo, una persona que construye un modelo mental de una ducha eléctrica puede representarlo inicialmente como si estuviese constituido por dos elementos, uno que controla el flujo de agua y otro que transforma energía eléctrica en calor o que calienta el agua, y dos relaciones 1) cuanto mayor el flujo de entrada de agua, más frío el flujo de salida y viceversa, 2) cuanto más energía eléctrica al sistema, más calor (más se calienta el agua).

Nótese que éste es un ejemplo hipotético, en el cual no está en cuestión si es cierto o no desde la Física. Sin embargo, puede muy bien ser el modelo mental que tiene una persona para ese dispositivo y funcionar para ella. Funcionabilidad es lo que requieren las personas de sus modelos mentales, no científicidad. Este modelo puede ser, a su vez, utilizado por el individuo en otro contexto, por analogía.

Obsérvese también que los elementos de un modelo mental pueden ser opacos, y generalmente lo son en alguna medida. Es decir, en el ejemplo anterior, la persona tendría en su modelo una entidad mental opaca que funcionaría sólo como convertidor de energía (eléctrica en térmica) y otra entidad mental opaca que serviría como controlador del flujo de agua.

Evidentemente, la persona podría construir un modelo mental para el objeto mental opaco que estamos aquí llamando convertidor de energía. Este modelo tendría entonces elementos que representarían el resistor, la corriente eléctrica, la disipación térmica y algún otro que fuera necesario.

Por otro lado, una persona puede ya tener un modelo mental para un elemento opaco (o haberlo construido una vez) y no utilizarlo porque no es necesario para representar un estado de cosas (el funcionamiento de la ducha eléctrica, por ejemplo).

El objeto de esta discusión es que puede haber modelos dentro de modelos, o sea los modelos mentales pueden tener “estructura interna”.

El razonamiento que nos trajo a esta hipótesis empezó cuando dijimos que los modelos están compuestos de elementos y relaciones. Otra manera de decirlo es la de que los modelos mentales se construyen a partir de elementos básicos organizados en una cierta estructura. Existiría ahí un constructivismo -- los modelos son construidos a partir de constituyentes más elementales (que pueden ser modelizados) -- que por regresión nos llevaría a lo que Johnson-Laird llama primitivos conceptuales, los cuales serían innatos. Es decir, el ser humano nace con algunos primitivos conceptuales (movimiento, por ejemplo). Además, él supone también la existencia de primitivos procedimentales, los cuales serían igualmente innatos, una vez que no podrían ser adquiridos a través de la experiencia pues la representación mental de la

experiencia ya requiere la habilidad de construir modelos mentales de la realidad a partir de la percepción (op. cit. p. 413).

El hecho de que los primitivos conceptuales o procedimentales sean innatos no significa que la teoría de Johnson-Laird sea innatista, sino que tiene aspectos innatistas, así como los tienen otras teorías constructivistas. Al final, la construcción humana debe comenzar en algún punto y es difícil imaginar que sea a partir de cero.

Además de los modelos causales como los descritos hasta ahora, hay otros tipos de modelos mentales pues las relaciones y los elementos pueden ser de otra naturaleza. Las relaciones pueden, por ejemplo, ser espaciales, temporales o de identidad. Los elementos pueden representar individuos o conceptos.

Por ejemplo, la proposición “Juan es profesor de Química” implica un modelo mental en el cual haya un elemento que corresponda a profesor de Química, otro correspondiente al individuo Juan, una relación de identidad Juan = profesor de Química y una de no-identidad pues hay profesores de Química que no son Juan.

Éste es un ejemplo simple. Construir un modelo mental de la proposición correspondiente a la primera ley de la Termodinámica ya sería mucho más complicado. Lo mismo sucedería con los enunciados de los problemas de Física, Química o Biología.

Como ya se ha señalado, la fuente primaria de los modelos mentales es la percepción, pero pueden ser construidos también a partir del discurso o ser fruto de nuestra imaginación. De hecho, la relación entre los modelos mentales y el discurso o la percepción es recíproca: los modelos mentales son construidos a partir del discurso o la percepción, y a su vez, la interpretación del discurso -- o sea, de las representaciones proposicionales que lo conforman o de los estímulos externos recibidos--, depende de los modelos mentales que seamos capaces de construir. Las restricciones, entonces, a la construcción de modelos mentales van a derivar de la estructura del mundo percibida o concebida, del conocimiento anterior del individuo y de la necesidad de mantener el sistema cognitivo libre de contradicciones, no saturando la capacidad de la memoria de trabajo.

Para finalizar esta sección, falta resaltar la relación entre modelos mentales y la comprensión de los fenómenos naturales. Entender cualquier fenómeno natural es saber su causa, poder describir sus consecuencias y predecir sus efectos, de forma que el individuo pueda provocarlo, influenciarlo o evitarlo, o, por lo menos, explicarlo. En términos de lo que hemos indicado hasta aquí, es tener un modelo mental de ese fenómeno, un modelo de trabajo en nuestras mentes que puede ser mentalmente manipulado, permitiéndonos hacer inferencias. Explicar y predecir acerca de los fenómenos naturales es comprenderlos y ello requiere la construcción de modelos mentales que actúen como análogos estructurales de los mismos, como intermediarios a la luz de los cuales adquieran significado los conceptos científicos y las relaciones que se establecen entre ellos para adquirir esa comprensión.

Modelos conceptuales

Los *modelos conceptuales* serán aquí considerados como aquellos inventados, diseñados, por investigadores, ingenieros, arquitectos, profesores para facilitar la comprensión o enseñanza de sistemas físicos, o estados de cosas físicas, objetos o fenómenos físicos. Son

proyectados como herramientas para el entendimiento y/o para la enseñanza de sistemas físicos (Norman, apud Gentner y Stevens, 1983, p. 7).

Los modelos conceptuales son representaciones externas, compartidas por una determinada comunidad y consistentes con el conocimiento científico que esa comunidad posee. Estas representaciones externas pueden materializarse en forma de formulaciones matemáticas, verbales o pictóricas, de analogías o de artefactos materiales. Un artefacto simulando la estructura de doble hélice del DNA, la analogía entre el átomo de Rutherford y el sistema solar o las formulaciones matemáticas del modelo de concha en la Física Nuclear son ejemplos de modelos conceptuales. Independientemente de la forma que puedan adquirir los modelos conceptuales de disciplinas como la Física (por ejemplo, un conjunto de fórmulas matemáticas y de leyes empíricas), la Química (por ejemplo, una serie de ecuaciones químicas y de estructuras geométricas) o la Biología (por ejemplo en la Genética, un conjunto de leyes probabilísticas), todos ellos tienen en común que son representaciones simplificadas e idealizadas de objetos, fenómenos o situaciones reales, pero son precisos, completos y consistentes con el conocimiento científicamente aceptado (Greca y Moreira, 1997a).

Por otro lado, los modelos mentales son representaciones que las personas construyen, idiosincrásicamente, para representar sistemas físicos (o estados de cosas más abstractos). Éstos no necesitan ser técnicamente precisos (y en general no lo son), pero deben ser funcionales. Ellos evolucionan naturalmente. Interactuando con el sistema, la persona continuamente modifica su modelo mental, revisando recursivamente esa construcción, hasta alcanzar una funcionalidad que la satisfaga. Obviamente, los modelos mentales de un individuo son limitados por factores tales como su conocimiento y su experiencia previa con sistemas semejantes, así como por la propia estructura del sistema de procesamiento de información del ser humano (Norman, op. cit. p. 8).

Hay, por lo tanto, importantes diferencias entre los modelos conceptuales que son representaciones externas bien delimitadas y definidas y los modelos mentales que son representaciones internas cuyo compromiso básico es la funcionalidad para el sujeto, o sea, deben permitirle explicar y predecir aunque no necesariamente en forma correcta desde el punto de vista científico.

Según Norman (ibid.) los modelos mentales tienen las siguientes características generales:

0. los modelos mentales son incompletos;
0. la habilidad de las personas para “ejecutar” (“rodar”) sus modelos es muy limitada;
0. los modelos mentales son inestables: las personas olvidan detalles del sistema modelado, en particular cuando esos detalles (o todo el sistema) no es utilizado por un cierto período de tiempo;
0. los modelos mentales no tienen fronteras bien definidas: dispositivos y operaciones similares son confundidos unos con otros;
0. los modelos mentales son “no-científicos”: reflejan las “supersticiones” y creencias de las personas sobre el sistema físico;
0. los modelos mentales son parsimoniosos: frecuentemente las personas optan por operaciones físicas adicionales en vez de una planificación mental que evitaría dichas operaciones; las personas prefieren gastar más energía física a favor de menor complejidad mental.

Es decir, los modelos mentales de las personas pueden ser deficientes en varios aspectos, tal vez incluyendo elementos innecesarios, erróneos o contradictorios. Sin embargo, deben ser funcionales. Esta funcionalidad permite inclusive que los modelos mentales sean generados en el momento y descartados cuando ya no son necesarios cognitivamente. Serían modelos de trabajo desechables.

Que los modelos mentales sean modelos de trabajo descartables no significa que algunos de ellos no puedan ser re-utilizados. Cuando un modelo mental ha resultado útil para un sujeto en varias ocasiones, es posible que todo él, o al menos algunas de sus partes, sea guardado en la memoria de largo plazo, acrecentando así el bagaje de conocimientos del sujeto.

Es importante notar que los modelos conceptuales son elaborados por personas que operan mentalmente con modelos mentales. Y son enseñados por individuos que también operan con modelos mentales. Y son aprendidos por sujetos que igualmente operan con modelos mentales. O sea, la mente humana funciona basándose en modelos mentales, pero con ellos puede generar, enseñar y aprender modelos conceptuales. De hecho, esos modelos mentales suponen y generan la construcción de conceptos que, articulados, dan lugar a modelos conceptuales y esa construcción conceptual también se ve justificada desde la perspectiva de Johnson-Laird.

Nersessian (1992) considera a los modelos mentales como niveles de análisis intermedios entre el fenómeno y el modelo (matemático, estructural, etc) final resultante, que es un modelo conceptual. No obstante, cuando los científicos comunican sus resultados, lo hacen a través de la lógica de sus fórmulas matemáticas, de la exposición de sus principios y leyes empíricas, de las estructuras bioquímicas resultantes, y de todo otro modelo conceptual que han creado, sin hacer mención de los modelos mentales que les sirvieron de niveles de análisis intermedios para la comprensión del fenómeno natural en cuestión. (A veces, sin embargo, los científicos indican en sus relatos autobiográficos, los modelos mentales que les sirvieron de peldaños en la construcción de sus teorías, aunque este conocimiento difícilmente llega al aula).

Un ejemplo de la utilización de un mismo modelo conceptual, pero que puede estar basado en distintos modelos mentales dependiendo de los individuos, fue encontrado por Greca y Moreira (1996). En entrevistas hechas con físicos en actividad, encontraron que éstos utilizan distintos modelos mentales a la hora de comprender fenómenos relacionados con el campo electromagnético, pensándolo como deformación geométrica, como un “gas con flechitas” o a partir de elementos generadores (cargas y dipolos magnéticos). Estos modelos les eran heurísticamente válidos para comprender el campo electromagnético, aunque después utilizasen el modelo conceptual científicamente compartido (las ecuaciones de Maxwell) cuando lo necesitasen para formalizar y presentar resultados de sus investigaciones, así como para enseñar.

Implicaciones para la enseñanza y aprendizaje

Modelos mentales y aprendizaje significativo. Modelaje

Empecemos por recordar que hay una distinción entre el sistema o fenómeno natural, el modelo conceptual³ del sistema o fenómeno natural y el modelo mental del mismo. Los modelos conceptuales son simplificaciones, recortes de la realidad -- que sirven para explicarla -- contruidos, enseñados y aprendidos por sujetos que operan cognitivamente con modelos mentales.

En la enseñanza, el profesor enseña modelos conceptuales y espera que el alumno construya modelos mentales que le permitan dar significados científicamente aceptados a esos modelos conceptuales que, a su vez, deben tener correspondencia con los fenómenos naturales o sistemas modelados.

Entonces, el objetivo inmediato de la enseñanza, mirando exclusivamente el aspecto cognitivo, sería, a través de modelos conceptuales, llevar al estudiante a construir modelos mentales adecuados (consistentes con los propios modelos conceptuales) de sistemas o fenómenos naturales. Esto sería válido también para conceptos científicos, pues éstos indican regularidades en eventos u objetos naturales y son representados internamente por modelos mentales.

Comprender un estado de cosas del mundo natural, un evento físico cualquiera, o un concepto de las ciencias naturales, implica tener un modelo mental de este evento o concepto. Es decir, cualquier individuo capta los fenómenos del mundo natural construyendo modelos mentales de ello. Por más que se enseñen modelos conceptuales, el aprendizaje significativo (en contraposición a un aprendizaje por repetición, mecánico) implica la construcción de modelos mentales.

La idea básica es que el modelo conceptual es un instrumento de enseñanza pero el instrumento de aprendizaje es el modelo mental. Naturalmente, el modelo mental puede ser muy semejante al modelo conceptual, aunque no necesariamente, pues la función del modelo mental es sólo la de permitir a su constructor dar significado al modelo conceptual que se le enseña y, por ende, al sistema físico modelado.

Por otro lado, el alumno cuando llega a las clases de Ciencias ya representó el mundo físico de lo que le es cotidiano, inicialmente a través de modelos mentales contruidos por percepción, por experiencia directa con el mundo, o por analogía con otros modelos generados, y posteriormente a través de esquemas de asimilación u otros constructos cognitivos estables. Esos modelos mentales, como se ha dicho, pueden ser deficientes en varios aspectos, tal vez incluyendo significados erróneos o contradictorios, pero son funcionales y pueden ser precursores de representaciones mentales estables.

Por ejemplo, para citar un par de casos, los alumnos tienen dificultad para entender el principio de inercia de la mecánica newtoniana pues el mundo percibido es un mundo que tiene embutido el rozamiento. Por causa de ese rozamiento, los modelos mentales que han generado desde que comenzaron a caminar y a mover objetos llevan implícita la noción de

³ En rigor, habría que distinguir también entre modelo físico y modelo conceptual, en el sentido de que éste sería una especie de "versión didáctica" de aquél (Greca y Moreira, 2002a). Sin embargo, dicha distinción no es necesaria para el objetivo de este trabajo.

que la velocidad con la cual se mueven las cosas depende del esfuerzo realizado, siendo difícil por ello modificar esta noción que ha adquirido gran estabilidad cognitiva, en razón de la funcionalidad de los modelos mentales que la originaron. Otra dificultad muy común es la vinculada a la comprensión de la naturaleza discontinua de la materia, dado que el mundo es percibido como continuo.

Cuando se le presentan modelos conceptuales en clases de Física, el alumno puede no revisar sus esquemas de asimilación o sus concepciones alternativas porque no percibe razones para eso o porque no quiere. Puede también generar modelos mentales híbridos (Greca y Moreira, 1998a), parte científicos parte no; o memorizar mecánicamente las listas de definiciones, principios, leyes o fórmulas que configuran el modelo conceptual, es decir, sin entenderlo. Hay varias posibilidades, incluso la de que modifique sus representaciones mentales estables hacia las científicas o construya modelos mentales que le permitan dar a los fenómenos físicos significados compartidos científicamente, que es lo que quieren los profesores. O sea, cuando los alumnos intentan comprender un modelo conceptual -- si es que lo consideran necesario -- toman de él los elementos que evalúan como importantes, los relacionan, si es que esto es posible, con aquello que ya conocen y generan, o no, modelos mentales que no son necesariamente coincidentes con los modelos conceptuales presentados. Cabe destacar que muchos de nuestros alumnos "ni" siquiera consiguen ver que aquello que les es presentado en clase conforma un modelo conceptual. Esto se debe básicamente a dos factores: en primer lugar, porque no tienen el conocimiento de dominio necesario para interpretarlos como modelos conceptuales; en segundo lugar, porque muchas veces los alumnos no comprenden que el modelo conceptual es una representación simplificada e idealizada de fenómenos o situaciones, y no el fenómeno o la situación en sí. La práctica docente en muchos casos no considera estos aspectos de la construcción del conocimiento científico y ello tiene consecuencias en los procesos de aprendizaje que, de este modo, generan representaciones alejadas de aquéllas que se pretende que se construyan.

Sin embargo, muchas veces no ocurre ni una cosa ni otra: los alumnos no construyen modelos mentales para interpretar las proposiciones que conformen el modelo conceptual y mucho menos representaciones mentales más potentes que las articulen y que correspondan a los modelos conceptuales subyacentes.

Desafortunadamente, lo que se ve en las clases de Ciencias es que los alumnos tienden a trabajar con proposiciones aisladas, memorizadas de manera literal y arbitraria. Las ecuaciones, las leyes y las definiciones de la Física, la Química o la Biología, son representaciones proposicionales, que están articuladas en modelos conceptuales y que exigen, por parte de quienes quieren comprenderlas, la construcción de modelos mentales. Sin este proceso, estas representaciones proposicionales carecen de significado, ya que sólo pueden adquirirlo a luz de modelos mentales.

En un estudio hecho por Greca y Moreira (1997 b,c) se obtuvieron evidencias de que los alumnos de mejor desempeño en electricidad y magnetismo fueron los que aparentemente habían formado un modelo mental de campo electromagnético que se aproximaba al modelo conceptual usado por los expertos. Los que trabajaron sólo con proposiciones (fórmulas, definiciones, enunciados) aisladas, limitándose a intentar aplicarlas mecánicamente, tuvieron el peor desempeño. La atribución de significado biológico, de vida, a la entidad "célula" se demoró dos siglos en los que básicamente se trabajaba con su imagen; ese sentido vivo, ese conjunto de procesos que lo permiten supone un conocimiento altamente estructurado en términos conceptuales de difícil aprehensión por parte del alumnado, cuya comprensión exige

la construcción de un modelo mental explicativo y predictivo que le dé sentido a ese funcionamiento característico de la materia viva. Una investigación realizada por Rodríguez Palmero (2000, 2001) ha mostrado evidencias de la necesidad de construir esos modelos mentales para dicha comprensión, observándose que algunos sujetos operan mentalmente con aquella simple y estática imagen repitiendo sin sentido frases (proposiciones) que “representan” o dan significado a los procesos que realmente caracterizan y definen a la célula como concepto y que, como es lógico, con la representación parcial generada, con un modelo insuficiente, no comprenden.

Aunque los modelos mentales pueden ser básicamente proposicionales o básicamente imagísticos o una mezcla de proposiciones e imágenes, sin embargo, las proposiciones están integradas, articuladas, relacionadas en el modelo. Un conjunto de proposiciones no relacionadas *no* forma un modelo mental y lo comentado con respecto a la célula puede ser un ejemplo.

Quizás existiría una “gradación de significatividad” que va desde la construcción de modelos mentales (consistentes con los modelos conceptuales enseñados) abarcadores que integren y articulen las distintas proposiciones, pasando por modelos mentales que les permiten a los alumnos comprender las representaciones proposicionales características de los modelos conceptuales de las Ciencias Naturales -- como ecuaciones, leyes, definiciones -- llegando hasta esquemas de asimilación adecuados para ciertos conjuntos de situaciones problemáticas científicas. Estos modelos muchas veces no son correctos desde el punto de vista científico, o son modelos parciales, o sea que dan cuenta de algunas partes de los modelos conceptuales, pero no del conjunto. En el nivel más bajo de esta “gradación de significatividad” estaría ubicado el uso mecánico de proposiciones sin modelos mentales que las representen internamente (lo que cognitivamente parece difícil que se dé, pero que en la práctica se tiene la impresión de que sí ocurre). Es decir, el aprendizaje sería tanto más significativo y más “correcto” desde las Ciencias cuanto más el sujeto fuera capaz de construir (y quisiera construir) modelos mentales abarcadores, articuladores y consistentes con los modelos conceptuales, que evolucionasen hacia esquemas de asimilación que dotarían de un alto grado de significatividad. Esta hipótesis necesita más apoyo experimental.

Si estas ideas respecto a modelos mentales y modelos conceptuales tienen sentido desde el punto de vista de las Ciencias y de la enseñanza y aprendizaje de las Ciencias, parecería útil saber cuál es la relación entre modelos mentales y modelos conceptuales para facilitar, en la enseñanza, la adquisición significativa de modelos conceptuales, es decir, facilitar la construcción de modelos mentales que permitieran el uso significativo (no mecánico, no automático, no sin significado) de los modelos conceptuales de las Ciencias por los alumnos.

Desafortunadamente, si bien es cierto que la distinción entre modelos conceptuales y modelos mentales es clara, su relación no lo es, así como no es clara tampoco la idea de construir modelos mentales “consistentes” con los modelos conceptuales (Greca y Moreira, 1997a). Esta confusión, que supone un isomorfismo entre el modelo terminado y lo que las personas tienen o construyen en sus cabezas, se traduce en la mayoría de los libros de texto de ciencias. Aquí, los modelos y teorías científicas aparecen como estructuras acabadas, lógicamente organizadas, sin tener en cuenta que esto no implica que las clases de representaciones que los científicos emplean para pensar o crear esos mismos modelos o teorías sean primariamente de esta forma, ni que para razonar en una situación problemática nueva utilicen esas mismas reglas lógicas o que los alumnos puedan construir modelos mentales a partir de esa estructura. El conocimiento que se transmite en esos materiales es un

conocimiento terminal y así generalmente se trabaja en las aulas, hasta el extremo de que incluso muchas veces esos mismos esquemas, gráficos, “imágenes” que se presentan en dichos materiales desvirtúan y dificultan la comprensión de los fenómenos naturales subyacentes a los mismos, simplifican hasta en exceso, si nos referimos a la educación no universitaria, los modelos conceptuales que pretenden expresar. ¿Cómo vamos a conseguir así que esos estudiantes generen modelos mentales consistentes a partir de esos “modelos conceptuales” tan simplificados y ya “representados y visualizados” que limitan su propia construcción idiosincrásica necesaria para la comprensión? Si la finalidad de la enseñanza es que el alumnado construya modelos mentales que generen esquemas de asimilación adecuados científicamente, el profesorado tendrá que analizar profundamente los modelos conceptuales que usa para ello, así como la manera de conseguirlo.

Lo cierto es que, en el marco de la teoría de Johnson-Laird (para que no olvidemos que todo esto viene de una teoría), el alumno, como cualquier ser humano, lo que construye para dar significado a estados de cosas del mundo son modelos mentales.

Esponáneamente, el estudiante siempre construirá *sólo* modelos mentales, los cuales son análogos estructurales del mundo cuyo único compromiso es la funcionalidad personal. Construir modelos conceptuales es otra cosa, tanto es así que los modelos conceptuales de las Ciencias son construidos por los científicos.

¿Implicaría eso que para enseñar modelos conceptuales es preciso también enseñar las “reglas del juego” o sea las “reglas del modelaje en Ciencias”?

Aunque esta pregunta tiene una respuesta casi obvia afirmativa en el caso de la Física o de la Química, posiblemente la respuesta no aparezca de forma tan clara en el caso de otras ciencias que integran el conjunto de las llamadas Ciencias Naturales, como la Biología. Sin embargo argumentaremos aquí que para el aprendizaje significativo de cualquiera de ellas parecería necesario el aprendizaje de las reglas del modelaje. Aunque en algunos casos, el saber científico parece que es una “copia” de la realidad, sin embargo, *siempre* las descripciones de las Ciencias son construcciones simplificadas e idealizadas de esa realidad, producto de teorías y creencias, y, por lo tanto, modelos. Por ejemplo, cuando se describen las causas o los síntomas de una determinada enfermedad, como la locura, esta descripción está determinada por el modelo de enfermedad (y, en este caso en particular, de sociedad) que se tenga, y puede ser modificado a lo largo del tiempo (Foucault, 1967)

Entonces, volviendo a la pregunta del párrafo anterior, la respuesta será sí probablemente para todas las Ciencias. Es bien posible que el aprendizaje de Ciencias sea tanto más significativo cuanto mayor sea la capacidad de modelar del alumno de una manera similar a como se modela en las distintas Ciencias. Pero eso, en principio, no es parte de su instrumental mental , aunque sí lo sean algunas de las técnicas, que son usadas para construir modelos mentales. O sea, los alumnos ya tienen las herramientas básicas para generar modelos mentales, con las cuales interpretar de manera corriente el mundo: crear simulaciones mentales, usar modelos mentales en contextos distintos por medio de analogías, realizar simplificaciones y recortes de la realidad, hacer idealizaciones y abstracciones. Sin embargo, estas herramientas, este instrumental cognitivo es utilizado de manera tácita. Habría que enseñarles que éstas son explícitamente usadas en la construcción de los modelos conceptuales de las Ciencias que el profesorado, consecuentemente, debe conocer en profundidad. ¡Hay que enseñárselo!

Estaría ahí una importante, quizás crucial, implicación para la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias, capaz de aproximar científicos, profesores e investigadores en enseñanza de las Ciencias. ¿Cómo es el modelaje en cada una de las disciplinas que conforman el elenco de las Ciencias Físicas y Naturales? ¿Cuáles son sus reglas? ¿Cómo se enseñan a un alumno? ¿Cuál es el efecto del modelaje en el aprendizaje significativo de las Ciencias? ¿Sería trivial decir que para aprender Ciencias es preciso aprender a modelar en Ciencias? ¿Sería una obviedad? Si es así, entonces no hacemos lo obvio, no enseñamos las Ciencias como ciencias de modelos y no enseñamos a los alumnos cómo modelar conceptualmente.

¡Mejor sería reconocer que el “juego” modelos conceptuales (de las Ciencias) versus modelos mentales (de los científicos, profesores y alumnos), desde la perspectiva de la enseñanza y del aprendizaje de las Ciencias, de trivial no tiene nada! ¡E intentar cambiar el enfoque de la enseñanza!

El aprendizaje significativo implica la construcción de modelos mentales, pero para facilitar el aprendizaje significativo de modelos conceptuales es muy probable que se deba pasar el foco de la enseñanza hacia el modelaje en Ciencias.

Sin embargo, aunque sea necesario que los alumnos aprendan explícitamente a modelar, el modelaje que se les debería enseñar o exigir no puede ser idéntico al modelaje utilizado por los científicos. O sea, cuando los científicos modelan, lo hacen para crear, generar nuevas teorías, describir y explicar nuevos fenómenos. De los alumnos no se espera que hagan lo mismo, sino que sean capaces de comprender los modelos conceptuales, o sea, que sean capaces de construir modelos mentales cuyos resultados -- explicaciones y predicciones -- sean consistentes con los modelos conceptuales. Por lo tanto, ¿se les debe enseñar a modelar? Sí. ¿Como los científicos? Más o menos.

En los apartados siguientes intentaremos apuntar implicaciones de los modelos mentales en algunos aspectos específicos de la enseñanza y el aprendizaje de las Ciencias, sin querer caer en ningún reduccionismo explicativo. Como cualquier teoría, la de los modelos mentales nos da explicaciones plausibles para algunas cosas y para otras no.

Modelos mentales y resolución de problemas

Aquí nos vamos a referir a los problemas de papel y lápiz que tradicionalmente se utilizan en cualquier curso de Física o de Química, por ejemplo. El problema es casi siempre formulado a través de un enunciado proposicional, o sea, a través del discurso lingüístico. Para el alumno, el problema empieza exactamente ahí. Para interpretar el enunciado es necesario construir un modelo mental del mismo, pero es difícil hacerlo por lo menos por dos cuestiones. En primer lugar, las proposiciones lingüísticas contienen indeterminaciones (para no hablar de ambigüedades). Los modelos mentales construidos a partir del discurso requieren una recursividad que el alumno frecuentemente no es capaz de hacer. El uso de representaciones externas pictóricas (dibujos, diagramas, gráficos) en el enunciado quizás puede ayudar a eliminar ciertas indeterminaciones de las representaciones lingüísticas y facilitar la construcción de un modelo mental del enunciado, si bien es cierto que a veces esas representaciones confunden más que aclaran por un exceso de simplicidad. En segundo lugar, las representaciones proposicionales que aparecen en el enunciado están referidas a modelos conceptuales, que no son necesariamente consistentes con las representaciones mentales que el alumno ya tiene (o sea, los productos -- explicaciones y predicciones -- de las

representaciones mentales del alumno y de los modelos conceptuales, no coinciden necesariamente).

No es una sorpresa o novedad que el alumno lo que hace es intentar descubrir cuál es la fórmula que sirve, cuál es la ecuación química correcta, cuál es el proceso biológico apropiado. En esta búsqueda por aprobar la disciplina (y por reducir los conflictos que les generan las ambigüedades con las que deben trabajar), los alumnos acaban muchas veces desarrollando algoritmos muy eficientes de resolución que enmascaran, tras una buena articulación y un buen dominio matemático, en el caso de la Física o la Genética, una ausencia total de comprensión de los conceptos envueltos en esas mismas fórmulas.

Naturalmente, la dificultad de construir modelos mentales a partir del discurso lingüístico, que tiene por detrás modelos conceptuales, no se manifiesta sólo en los enunciados de los problemas. Esos problemas y situaciones que manejan modelos conceptuales dan por hecho que el sujeto construye un modelo mental al respecto y el fracaso en el desempeño de estas actividades por parte del alumnado posiblemente tenga su razón de ser precisamente en la ausencia de ese modelo mental que lo dote de comprensión acerca de esos enunciados de manera que pueda entender qué es lo que se le pregunta, afirmación ésta que es evidente que requiere contrastación empírica.

Las formulaciones lingüísticas de las leyes y principios científicos, las definiciones, las descripciones de fenómenos naturales, que están en los libros o que presenta el profesor en las clases generan en el alumno las mismas dificultades.

¡Hay que tener eso en cuenta en la enseñanza de las Ciencias!

Modelos mentales y prácticas de laboratorio

En el laboratorio didáctico tradicional característico de cualquiera de las disciplinas de Ciencias, el alumno en general recibe el equipo, una guía de laboratorio y algunas instrucciones del profesor o de un ayudante. El objetivo es que redescubra algo, que aprenda algún procedimiento científico o, simplemente, que tenga la oportunidad de ver en la práctica algún fenómeno que ha estudiado conceptualmente. Para el alumno, dicha actividad de laboratorio puede ser interpretada como otra clase de "problema de Ciencias", quizás más difícil inicialmente pues además de tener que entender el "enunciado" (representado por la guía), lo que implica modelar mentalmente el experimento, él/ella debe además construir modelos mentales de los dispositivos experimentales, o sea, de cómo funcionan los aparatos si es que quiere dar significado a toda la actividad experimental.

En el caso del equipo, de los dispositivos experimentales, es útil el concepto de modelo mental de de Kleer y Brown (1983) mencionado anteriormente en este texto. Sin embargo, lo importante desde la óptica instruccional es que, así como en los problemas o en las clases teóricas, en el laboratorio también está presente la cuestión de los modelos conceptuales, de los modelos mentales y del modelaje. Para dar significado a los experimentos de laboratorio, el alumno tiene que modelarlos mentalmente de modo adecuado. El hecho de que el aprendizaje mecánico (p. ej., mediciones y gráficos hechos mecánicamente, sin significado; resultados no interpretados) esté tan presente en las clases de laboratorio de Ciencias -- que es el equivalente de la resolución mecánica de problemas --

sugiere que su preparación no tiene en cuenta el tema modelos conceptuales/modelos mentales/modelaje. ¡Pero debería tenerlo, sin duda!

Modelos mentales y concepciones alternativas

¿Serían los modelos mentales lo mismo que las viejas y conocidas concepciones alternativas? Nos parece claro que no. No tendría sentido. Sería sólo un cambio de nombre. Como se sabe, hay muchísimos estudios respecto a concepciones alternativas en Ciencias y se pueden organizar verdaderos catálogos de dichas concepciones. Sin embargo, es bien posible que tengan su origen en modelos mentales. Recordemos que el modelo mental es construido para explicar, describir y prever, con el único compromiso de ser funcional para su constructor. Es decir, el sujeto ha construido modelos mentales que han adquirido "estabilidad cognitiva" (porque han funcionado bien muchas veces), que han sido guardados, entonces, en la memoria de largo plazo en forma de esquemas y que son traídos a la memoria de trabajo y "rodados"(ejecutados) para generar una previsión con respecto al comportamiento de un sistema físico, de un dispositivo, de una situación física. Dicha previsión sería, de este modo, interpretada como una concepción alternativa. Es decir, ya no sería más un modelo mental.

Naturalmente, lo que llamamos modelo con "estabilidad cognitiva" puede ser considerado una concepción alternativa. Se sabe muy bien que algunas concepciones alternativas son muy estables, muy resistentes al cambio, muy enraizadas. Por eso mismo no pueden ser consideradas modelos mentales, que son representaciones construidas en la memoria episódica para dar cuenta de situaciones nuevas.

Es más, los modelos mentales son representaciones, son formas, intermediarios que utiliza la mente humana como herramientas para adquirir comprensión; se mueven, por lo tanto, en el terreno psicológico y cabe la posibilidad, consecuentemente, de que constituyan el sustrato que da lugar a concepciones alternativas, que las condicione. Un modelo mental de célula que sea dual, es decir, que atienda por un lado a su estructura y por otro a su fisiología pero independientemente, generará concepciones alternativas de funcionamiento-suma de la misma, o sea, un funcionamiento celular basado en el comportamiento o papel de sus elementos constituyentes, no estableciendo interacciones entre los mismos; un modelo mental sólo estructural de célula tendrá como resultado concepciones alternativas acientíficas relativas a los procesos metabólicos, por ausencia de comprensión al respecto.

Sin embargo, la relación entre concepciones alternativas y modelos mentales es un tema que debe ser profundizado teórica y empíricamente (Greca y Moreira, 2002b).

Modelos mentales y cambio conceptual

Desde la emergencia de las concepciones alternativas como tema de investigación en enseñanza de la Física, el cambio conceptual, entendido como una sustitución desde las concepciones alternativas hacia las científicas, ha sido casi una obsesión de los profesores e investigadores. Dicho cambio fue inicialmente interpretado de manera errónea como un reemplazo, resultante de un conflicto cognitivo, de una concepción por otra; fue también erróneamente imaginado como un cambio de paradigmas al estilo de Kuhn; finalmente, se llegó a una interpretación más plausible: el cambio conceptual como evolución conceptual (Moreira, 1994). Sin embargo, todavía no se sabe muy bien cómo ocurre esa evolución conceptual ni cómo facilitarla en el aula.

Quizás el constructo modelo mental pueda ofrecer alguna luz en esa dirección. Considerando que la recursividad es una característica fundamental de los modelos mentales, tendríamos ahí un mecanismo innato. para el cambio conceptual, en el sentido de evolución. Las nuevas informaciones pueden ser aprendidas en la medida en que puedan ser incorporadas, adicionadas a los modelos mentales de los alumnos a través de los procedimientos cognitivos de revisión de modelos mentales. A partir de los primitivos conceptuales se construyen (modelos mentales de) conceptos que una vez encajados en la estructura cognitiva establecen relaciones y conexiones con otros, modificándola en su conjunto. Y esa construcción de conceptos nuevos requiere el concurso de primitivos procedimentales y de otros procesos cognitivos que el propio Johnson-Laird justifica adecuadamente. El autor considera tres conjuntos fundamentales: a) conjunto de elementos que representan elementos de las entidades reales; b) conjunto de propiedades y características de esos elementos que representan propiedades y características de esas entidades en el mundo real; c) conjunto de relaciones entre esos elementos que representan las relaciones que se establecen entre esos mismos elementos en ese mundo real. Construyendo mentalmente estos conjuntos, añadiéndoles elementos, enriqueciéndolos, construimos un modelo mental más comprensivo de la realidad -- mundo -- que se representa en la medida en que explica y predice más y de mejor manera. En este sentido, cambiamos la representación conceptual pero por evolución, por enriquecimiento partiendo de aquello que fue construido y que se reconstruye paulatinamente por revisión recursiva. Quizás la célula nos vuelva a servir de ejemplo; se construye una representación simple, estática, incluso en edad temprana y es sobre ese modelo sólo estructural sobre el que se construye un conjunto de características físico-químicas de sus moléculas constituyentes y de sus orgánulos integrantes (o sea, elementos del primer conjunto y elementos del segundo conjunto) y, sobre todo, un tercer conjunto de conexiones e interacciones entre los mismos que justifican su comportamiento vivo y, por ende, la comprensión del significado real del concepto "célula".

Sin embargo, parece plausible pensar que algunos modelos mentales tengan un "núcleo duro" o "núcleo central" y un cinturón protector al estilo de Lakatos (1989). De esta forma se podría explicar por qué algunas ideas de los alumnos son tan difíciles de cambiar y otras no. Podríamos pensar que muchas veces el cambio conceptual no ocurre porque la enseñanza sólo consigue producir algunos pequeños cambios en ese cinturón, cambios producidos básicamente por esos procesos de revisión que señalábamos antes. Podríamos también pensar que en ciertos casos sería necesario construir otro núcleo en vez de intentar modificar un núcleo central ya existente. Un caso de éstos, que parecería ser necesario para la comprensión del concepto de fuerza, sería el del paso de una serie de modelos con núcleo duro "relaciones causales", a otra serie de modelos, con núcleo duro "interacciones" (Greca y Moreira, 1998b).

Son especulaciones con respecto a la potencialidad de la idea de modelo mental como mecanismo básico de nuestro funcionamiento cognitivo.

Imágenes y enseñanza/aprendizaje

En su libro de 1983, Johnson-Laird define imágenes como vistas de modelos mentales, como perspectivas, como "visuales" de un modelo subyacente. En un artículo reciente (Johnson-Laird, 1996), como ya se ha comentado, este autor considera que las imágenes parecen ser algo más que casos especiales de modelos mentales. A pesar de que las imágenes a veces funcionan como modelos y que ambos modos de representación están más relacionados entre sí que cada una de esas representaciones con las proposicionales, las imágenes son distintas de los modelos e involucran procesos mentales diferentes (p. 92).

Independientemente de que sean tan distintas de los modelos, las imágenes parecen tener un papel importante en el aprendizaje de las Ciencias. Por ejemplo, es mucho más fácil construir un modelo mental a través de la percepción visual que a través del discurso. ¿Significaría eso que la instrucción y los materiales instruccionales deberían estar llenos de dibujos, diagramas y figuras como en general están los que son actualmente utilizados? Quizás no, pues así la capacidad de “imaginar” del alumno podría estar siendo inhibida y ya hemos comentado estos riesgos. O sea, puede suceder que el alumno quede con la imagen de la figura que aparece en el libro, sin formar modelos mentales de los mecanismos subyacentes. Los ejemplos para ilustrar este punto son muchos (y, en general, bastante conocidos por los profesores). Piénsese en el dibujo “planetario” del átomo, en el campo eléctrico “puntillado” de una carga – restringido al espacio del dibujo --, o en la simple y libre imagen de célula. En todos los casos, la imagen dificulta la comprensión de los conceptos que pretende ilustrar (Fischler y Lichtfeldt, 1992; Greca y Moreira, 1998 a,b; Rodríguez Palmero, 2000). Esta cuestión es de relevante importancia para el diseño de material instruccional.

Por otro lado, tanto entre los físicos como entre los estudiantes de Física hay quienes operan cognitivamente en Física con modelos básicamente imagísticos (Greca y Moreira, 1997, 1998). ¿Serían dichos modelos mejores que otros más proposicionales, en el sentido de ser más consistentes y robustos? ¡Habría que investigar! Lo cierto es que las imágenes, sea como casos especiales de modelos mentales sea como un tipo bastante distinto de representación mental, tienen claras implicaciones para la enseñanza/aprendizaje de las Ciencias.

Sugerencias para la investigación en enseñanza de las ciencias

Las implicaciones para la enseñanza y para el aprendizaje enfocadas en las secciones anteriores ya anticiparon, por lo menos implícitamente, algunas cuestiones de investigación con respecto al fenómeno de interés que podríamos llamar *modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza/aprendizaje de las Ciencias* que ha constituido el tema básico del presente texto.

Sin embargo, antes de finalizar vale la pena explicitar algunas de esas cuestiones a título de sugerencia:

- ✍ ¿Cómo distinguir entre alumnos que modelizan mentalmente de manera que den significado a los modelos conceptuales que se les enseñan y los que no lo hacen? ¿Cuáles son los indicadores de modelización mental adecuada?
- ✍ ¿Cómo identificar posibles modelos mentales? ¿Cómo tener seguridad de que lo que fue identificado como modelo mental es, de hecho, un modelo mental? ¿Simulándolo en un ordenador, como sugiere Johnson-Laird?
- ✍ Johnson-Laird dice que los modelos mentales son construidos a partir de elementos básicos que él llama "tokens". ¿Qué son verdaderamente esos "tokens"? ¿Cuáles son los "tokens" claves en la Física, la Química, la Biología, la Geología, ..., en las Ciencias?

- ✍ ¿Tendría sentido hablar de un "núcleo central" del modelo mental? ¿Un mismo núcleo podría ser compartido por más de un modelo"? ¿O por una "familia" de modelos mentales?
- ✍ ¿Hay correlación entre modelos mentales y resolución de problemas en las Ciencias? ¿Es importante modelizar el enunciado?
- ✍ ¿Cuál es la relación entre modelos mentales y modelos conceptuales? ¿En el aprendizaje, lo ideal es que prácticamente coincidan? ¿Es posible eso?
- ✍ ¿Cómo ayudar a los alumnos a construir modelos mentales que les permitan aprender de manera significativa los modelos conceptuales de las Ciencias?

Conclusión

En la introducción señalamos que enfocaríamos un tema con potencialidad para aproximar la vertiente curricular e instruccional de la enseñanza en Ciencia y la vertiente investigativa en ese campo. Si es que queremos mejorar la enseñanza de la Ciencia, por un lado, no debemos continuar produciendo materiales instruccionales y cambiando el currículum al azar, es decir, sin ningún referente teórico; y, por otro, tampoco debemos continuar investigando el aprendizaje sin preocuparnos de la instrucción y el currículum. La Psicología Cognitiva contemporánea y, en particular, la teoría de los modelos mentales, por su relación con los modelos conceptuales de las Ciencias, parece ofrecer una rica oportunidad de acercamiento entre la investigación y el desarrollo curricular e instruccional en la enseñanza de las Ciencias.

Referencias

- De Kleer, J. and Brown, J.S. (1983). Assumptions and ambiguities in mechanistic mental models. In Gentner, D. and Stevens. A.L. (Eds.). *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Duit, R. (1993). Research on students' conceptions – developments and trends. *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. New York: Cornell University.
- Fischler, H. and Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, London, 14(2): 181-190.
- Foucault, M. (1967). *Historia de la locura en la época clásica*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Gentner, D. and Stevens, A.L. (Eds.) (1983). *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Greca, I.M. and Moreira, M.A. (2002a). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, New York, 86(1): 106-121.

- Greca, I.M. and Moreira, M.A. (2002b). Além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Uma proposta representacional integradora. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 7(1).
- Greca, I.M. y Moreira, M.A. (1997a). Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, 15 (2),: 107-120.
- Greca, I.M. y Moreira, M.A. (1997b). The kinds of mental representations - models, propositions and images - used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, London, 19(6): 711-724.
- Greca, I.M. y Moreira, M.A. (1998a). Modelos mentales y aprendizaje de Física en electricidad y magnetismo. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, 16(2): 289-303.
- Greca, I.M. y Moreira, M.A. (1998b). Modelos mentais e modelos físicos no ensino e na aprendizagem da Física. Trabalho apresentado no VI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Florianópolis, 26 a 30 de outubro.
- Hampson, P.J. and Morris, P.E. (1996). *Understanding cognition*. Cambridge, MA: Blackwell Publishers Inc.
- Johnson-Laird, P.N. (1983). *Mental models*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P.N. (1996). Images, models, and propositional representations. In De Vega et al. *Models of visuospatial cognition*. New York: Oxford University Press. p. 90-127.
- Krapas, S., Queiróz, G., Colinviaux, D. e Franco, C. (1997). Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 2(1): 185-205.
- Lakatos, I. (1989). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza.
- Moreira, M.A. (1994). Cambio conceptual: crítica a modelos actuales y una propuesta a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. Actas de la Conferencia Internacional *Science and Mathematics Education for the 21st Century: Towards Innovatory Approaches*. Concepción, Chile, 26 de septiembre al 1^o de octubre.
- Moreira, M.A. (1997). Modelos mentais. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 1(3): 193-206.
- Nercessian, N. (1992). Construction and instructing: the role of “abstract techniques” in creating and learning physics. In Duschl, R. and Hamilton, R. (Eds.). *Phylosophy of science, cognitive psychology and educational theory and practice*. New York: SUNY Press. 49-68.

- Norman, D.A. (1983). Some observations on mental models. In Gentner, D. and Stevens, A.L. (Eds.). *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Pylyshyn (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80, p. 1-24.
- Rodríguez Palmero, M. L. (2000). Modelos mentales de célula. Una aproximación a su tipificación con estudiantes de COU. Universidad de La Laguna. Tesis Doctoral.
- Rodríguez Palmero, M^a L., Marrero Acosta, J. y Moreira, M.A. (2001). La teoría de los modelos mentales de Johnson-Laird y sus principios: una aplicación con modelos mentales de célula en estudiantes del Curso de Orientación Universitaria. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 6(3): 243-268.
- Sternberg, R.J. (1996). *Cognitive psychology*. Forth Worth, TX: Harcourt Brace College Publishers. 555 p.