

UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Filosofía y Humanidades
Escuela de Postgrado
Centro de Estudios Cognitivos

Razonamiento Basado en Modelos: Desde las ciencias cognitivas hacia su aplicación en educación

Tesis para optar al Grado de Magíster en Estudios Cognitivos

Alumna:

Nelly Córdova Caro

Profesor Guía: Guido Vallejos Oportot

Santiago, Chile

2011

Esta tesis contó con el financiamiento del Proyecto Fondecyt N° 1095020:
"Razonamiento Basado en Modelos (RBM) y Generación de Hipótesis"

Agradecimientos . . .	5
RESUMEN . . .	6
INTRODUCCIÓN . . .	8
Capítulo I. Modelos Mentales y Razonamiento Basado en Modelos: Demarcación temática y nociones fundamentales . . .	11
1.1. Presentación del marco teórico de los Modelos Mentales y Razonamiento Basado en Modelos. . .	11
1.1.1. Mezclando la realidad con la ficción: Relación de los modelos con el razonamiento. . .	11
1.1.2. Una diferencia fundamental: Sobre la oposición entre la visión tradicional de razonamiento y el RBM. . .	13
1.1.3. Antecedentes teóricos y posiciones fundamentales del RBM. . .	14
1.1.4. El RBM como respuesta al problema de explicar la creatividad científica. . .	19
1.2. Representaciones modélicas: Definición y caracterización de los modelos. . .	21
1.3. Sustrato Cognitivo de los Modelos Mentales y el RBM. . .	28
1.3.1. Procesos Cognitivos Asociados al RBM. . .	28
1.3.2. Tipos de modelos como representaciones organizadas de información . . .	34
1.3.3. Los modelos y el problema sobre la mente individualizada, extendida, distribuida y corporizada. . .	37
1.3.4. El rol de la simulación en la elaboración y manipulación de modelos. . .	41
1.4. El RBM: cómo opera y sus componentes. . .	43
1.4.1. Fases y estructura general del RBM. . .	48
1.4.2. Construcción de modelos a través de analogías . . .	52
1.4.3. El rol de las representaciones de imaginaria en el RBM. . .	58
1.5. Recapitulación. . .	63
1.6. Conclusión. . .	65
Capítulo 2. Razonamiento Basado en Modelos en la Educación: Análisis de una propuesta. . .	67
2.1. El proceso de RBM visto desde una óptica instruccional. . .	67
2.2. El Caso S2 y algunas lecciones sobre cómo orientar procesos de enseñanza y aprendizaje basados en modelos. . .	70
2.3. Enseñanza y Aprendizaje Basado en Modelos: análisis de una propuesta instruccional. . .	76
2.3.1. Modos de EABM en la co-construcción de modelos. . .	78
2.3.2. Estrategias didácticas presentes en EABM . . .	81
2.3.3. Organización curricular por niveles y ciclos de enseñanza. . .	86
2.3.4. Análisis de un caso de EABM. . .	92
2.4. Recapitulación. . .	100
2.5. Conclusión. . .	101
CONCLUSIONES . . .	102
Bibliografía . . .	106
Anexo . . .	110

Agradecimientos

Quiero expresar mis más cordiales agradecimientos a mis seres queridos, a mi familia y amigos, que me impulsaron a perseverar en momentos de dificultad. En especial a mis padres y hermana, quien además de entregar su apoyo constante contribuyó a esta investigación con sus experiencias en el área del diseño.

Agradezco especialmente y con mucha admiración, al profesor Guido Vallejos, Director del Centro de Estudios Cognitivos de la Universidad de Chile. Su sabia y oportuna orientación fue fundamental para dar a luz este trabajo. La formación recibida de su parte ha sido un aporte invaluable en mi desarrollo profesional.

Agradezco a mi amigo Juan José Fuentes, académico del Departamento de Filosofía de la Universidad de Chile. Sus valiosos consejos y experiencia ayudaron a impulsar e iluminar la redacción de este trabajo.

Agradezco a las alumnas de enseñanza básica y media del Centro Educacional Santa Clara por su animada y comprometida participación en las actividades que contribuyeron a esta investigación.

Finalmente, agradezco a Fondecyt, que a través del Proyecto N° 1095020: “Razonamiento Basado en Modelos (RBM) y Generación de Hipótesis” ha financiado la investigación que dio origen a esta tesis, y a los profesores Alejandro Ramírez y Guido Vallejos por incluir mi tesis en el proyecto.

RESUMEN

La teoría del Razonamiento Basado en Modelos (RBM) es el resultado de una línea de investigación en ciencias cognitivas, específicamente en psicología cognitiva, que plantea que los procesos de razonamiento del ser humano pueden ser mejor comprendidos si se estudian desde una óptica no formal. Esto significa que el razonamiento no se explica por la aplicación de una concatenada secuencia lógica de enunciados, sino por la manera como el razonador es capaz de representar el contenido semántico a través de la generación de modelos. Los modelos pueden consistir en representaciones diagramáticas, analógicas y simulaciones, entre otros formatos.

El reconocimiento del lugar que tienen las representaciones modélicas en el razonamiento tiene sus antecedentes en las primeras décadas del siglo XX, considerándose seminales las obras de Kenneth Craik y Ludwig Wittgenstein. Pero no es hasta comienzos de 1980 que toma fuerza la idea de que el razonamiento humano puede ser comprendido como una operación en base a *Modelos Mentales* y no por la aplicación de reglas de inferencia, como lo habían entendido las explicaciones tradicionales sobre el razonamiento.

Actualmente, la idea de que razonamos a través de modelos se ha convertido en una perspectiva para comprender cómo se desarrollan los procesos de cambio conceptual en el pensamiento científico. Con su enfoque histórico-cognitivo, Nersessian muestra que las prácticas científicas creativas tienen como sustrato la utilización del RBM. Esto representa un cambio en el foco de análisis desde los resultados de la investigación científica hacia los procesos conducentes a la elaboración de nuevas explicaciones.

Esta línea de investigación ha tenido resonancia en el ámbito de la educación. Tradicionalmente, las teorías sobre el aprendizaje planteadas por la psicología han sido la fuente de orientación para las prácticas docentes en lo que concierne a la ejecución de las clases y la planificación curricular. Teniendo como punto de partida que una verdadera educación en ciencias debe considerar la forma como efectivamente se desarrolla la actividad científica, desde hace un par de décadas se desarrollan propuestas que buscan implementar la teoría de RBM en la educación, esto con el fin de educar en las habilidades cognitivas que están involucradas en el pensamiento científico.

En esta investigación se desarrollan dos núcleos temáticos que se complementan. Primero, se presenta la teoría de RBM y se la sitúa en el contexto de las ciencias cognitivas. Para cumplir con ese cometido se tienen como principales referentes las obras de Johnson-Laird y Nersessian. Se evidencian las concepciones sobre la cognición que subyacen en general a esta teoría y la compatibilidad de la teoría sobre RBM con otras teorías de la ciencia cognitiva, como la cognición distribuida y corporizada. En segundo lugar, se establece un puente entre la teoría del RBM y educación. Se examina un ejemplo de dicha aplicación, a través del examen de las propuestas de John Clement y sus colaboradores. Esto con el propósito de analizar la aplicación de la teoría sobre RBM en educación, evaluando las posibilidades que ofrece en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias. Finalmente se realiza un análisis crítico sobre esta particular conexión entre ciencias cognitivas y educación.

Por medio de la revisión bibliográfica, la presentación y análisis de ejemplos y casos, se llega a la conclusión de que efectivamente la teoría de RBM constituye un enfoque sobre el razonamiento que contribuye positivamente a la educación en ciencias, tanto en lo que concierne a la planificación curricular como en la ejecución de actividades de aprendizaje concretas en aula.

Esto permite concluir que las ciencias cognitivas pueden ser consideradas como una fuente de conocimientos útiles para el ámbito pedagógico. Se constatan además los alcances y limitaciones de esta contribución.

INTRODUCCIÓN

Cuando nos encontramos frente a problemas cotidianos - como decidir una ruta a seguir, planificar las actividades del día, resolver en qué gastaremos nuestro dinero - los recursos cognitivos a nuestra disposición son diversos. La solución de problemas en estos casos involucra el uso de información sensorial, registros de memoria, simulaciones mentales, la imaginación, etc. Frente a estas situaciones es importante cuestionarse: ¿qué es lo que efectivamente involucra y en qué consiste la actividad humana de razonar? Las explicaciones tradicionales dan cuenta de este fenómeno entendiéndolo como un proceso que se sostiene sobre operaciones lógicas realizadas de acuerdo a reglas. Es así que por mucho tiempo – siglo XX incluido- el estudio de la lógica, y los procesos de inferencia que posibilitan su aplicación, fueron el foco de atención de quienes se interesaban por el estudio del razonamiento. No obstante pareciera ser que en esta escena algo se estaba perdiendo.

El estudio del razonamiento humano es uno de los campos más apasionantes de investigación. Hoy en día, a partir de las investigaciones en ciencias cognitivas, el estudio del razonamiento se ha vuelto un territorio para el surgimiento de variadas teorías. Existen, por ejemplo, enfoques puramente computacionales que intentan simular los procesos inferenciales, hasta otros más alternativos que sostienen que nuestra cognición es extendida y por lo tanto los procesos de razonamiento están comprometidos con la información y el material disponible en nuestro entorno.

Investigaciones de las tres últimas décadas en psicología cognitiva han dado origen y sustento cada vez mayor a una forma de comprender el razonamiento distinta de la que tradicionalmente se ha tenido. Partiendo de la distinción entre la sintaxis, entendida como el conjunto de reglas que rige la construcción de un discurso, y la semántica, entendida como el conjunto de significados que se extraen de la interpretación del mismo, cabe preguntarse si es adecuado comprender los procesos de razonamiento solo en virtud de la sintaxis. Las evidencias en ciencias cognitivas parecen decir que no. Las pautas contextuales y la interpretación particular que da cada sujeto a una situación determinan enormemente el tipo de conclusiones que extrae sobre un determinado problema. Un ejemplo sencillo de esto puede ser el denominado “sesgo de confirmación” donde los razonadores tienen una tendencia a extraer conclusiones basadas en información que se acomoda a sus creencias o expectativas.

La teoría del Razonamiento *Basado en Modelos* (RBM) de Nersessian y su antecesora, la teoría de los *Modelos Mentales* de Johnson-Laird, se enmarcan en este propósito de dar una mirada distinta a la tradicional sobre los procesos de razonamiento. La teoría de los Modelos Mentales resulta interesante de examinar principalmente porque pone en el centro de la habilidad de razonar humana, no la operación regida por las reglas de la lógica, sino la elaboración y manipulación de modelos. La teoría del RBM propuesta por Nersessian complementa esta idea, agregando que la actividad científica, en particular la creación de nuevas concepciones en ciencia, puede ser explicada como un proceso de RBM. Definir qué son los modelos en este contexto teórico y cómo se conforma el razonamiento a partir de estos es parte importante del tema de esta investigación. Uno de los propósitos principales de este trabajo es dar cuenta de los planteamientos de Johnson-Laird y Nersessian sobre RBM analizando su particular aproximación a la comprensión del razonamiento humano.

El segundo gran foco de interés es evidenciar la aplicación de la teoría sobre RBM en educación en ciencias. Este es el otro eje temático de esta investigación: mostrar cómo se construye, en este caso particular, el puente entre las ciencias cognitivas y la educación. El interés se centra en indagar de qué manera una teoría que explica cómo razonamos se aplica en una propuesta pedagógica para formar habilidades para pensar científicamente en base a modelos.

La psicología es una de las principales disciplinas entre las ciencias de la educación. A través de las teorías de la psicología los docentes reciben información útil para programar y desarrollar su práctica pedagógica. La psicología cognitiva en particular, contribuye al ofrecer un cuerpo de conocimientos sobre cómo ocurren los diversos procesos psicológicos implicados en la cognición humana. En el caso específico de la teoría sobre RBM, se vislumbra una contribución en la comprensión de los procesos de razonamiento, uno de los pilares fundamentales de la cognición humana.

Dado este contexto general, la hipótesis de esta investigación es la siguiente:

La visión defendida por algunos autores al interior de las ciencias cognitivas sobre el rol fundamental de los modelos en el pensamiento y el razonamiento humano constituye un sólida aproximación a la comprensión de los procesos de resolución de problemas y creatividad científica y es, a su vez, potencialmente fecunda para la generación de estrategias de planificación y didáctica para la enseñanza de las ciencias.

De la hipótesis se desprenden los siguientes objetivos a cumplir con el desarrollo de esta investigación:

- Exponer las teorías seleccionadas (Modelos Mentales y RBM) y mostrar su consistencia como aproximaciones a la comprensión de los procesos de razonamiento.
- Evidenciar y explicar cómo la teoría de RBM da cuenta de la resolución de problemas y de la creatividad científica.
- Dar a conocer y analizar críticamente propuestas que implementan la teoría de RBM en la enseñanza de las ciencias.
- Concluir sobre la consistencia del enfoque del RBM como forma de comprender el razonamiento y sus eventuales aplicaciones en educación.

Los dos ejes temáticos ya mencionados definen el contenido de los dos capítulos que conforman este trabajo. El primero de ellos es sobre la teoría del RBM en general y, el segundo, trata de la aplicación de dicha teoría en el ámbito de la educación. La forma de exposición contempla la división de cada capítulo en secciones donde se exponen y analizan los temas que se han considerado más relevantes, mezclando la revisión bibliográfica con el análisis de casos y ejemplos. Cada capítulo termina con una revisión de las ideas más importantes desarrolladas y una breve conclusión. Las conclusiones generales de la investigación son presentadas al final.

Para acotar el ámbito de la investigación se ha escogido principalmente a tres autores: Philip Johnson-Laird, Nancy Nersessian, y John Clement. La teoría de Johnson-Laird sobre modelos mentales servirá de fuente principal para caracterizar en general la idea de que los humanos razonamos en base a modelos y no sobre la aplicación de reglas lógicas, para definir qué es un modelo mental y cuáles son sus diversos formatos. A través del análisis de la obra de Nersessian se indagará más específicamente en qué consiste el RBM, cuáles son los procesos cognitivos involucrados tanto en la construcción de modelos, como en la

operación de razonar haciendo uso de ellos y el rol que tiene el RBM en la generación de nuevas concepciones, específicamente en el ámbito de las ciencias. Finalmente, por medio de la revisión de las investigaciones y propuestas de Clement se examinará la aplicación de la teoría sobre RBM en educación.

Capítulo I. Modelos Mentales y Razonamiento Basado en Modelos: Demarcación temática y nociones fundamentales

Este capítulo tiene como propósito exponer un marco teórico en el que se defina y caracterice la noción de Razonamiento Basado de Modelos (RBM). A través de su desarrollo pretendo evidenciar que esta concepción sobre razonamiento es un enfoque teórico sólido para comprender procesos de razonamiento humano en el ámbito cotidiano y en el científico experto. Espero, además, al concluir este capítulo, mostrar que la teoría sobre RBM puede ser erigida como una forma de comprender los procesos de razonamiento conducentes a la generación conceptual creativa. Se expondrán principalmente dos propuestas, la de Philip Johnson-Laird y Nancy Nersessian. Ambos autores son dos de los principales referentes en ciencias cognitivas en el estudio del rol que tienen los modelos en el razonamiento, y es además hacia sus teorías donde se dirigen principalmente las miradas para las aplicaciones del RBM en educación.

1.1. Presentación del marco teórico de los Modelos Mentales y Razonamiento Basado en Modelos.

1.1.1. Mezclando la realidad con la ficción: Relación de los modelos con el razonamiento.

Existe una elipsis clásica del cine popular presente en la película *2001: Una Odisea en el Espacio*. Las escenas: un simio que arroja al aire un hueso, y después del corte, un satélite artificial que navega en el espacio exterior. La idea detrás de ese salto en el tiempo es simple: representar la evolución de la tecnología humana. Si retrocedemos algo en la película, el salto cualitativo que llevó al simio hasta el descubrimiento de las herramientas - o en otras palabras, hasta la capacidad de otorgar una función a las cosas - se representa a través de la presencia de un misterioso monolito de líneas perfectas, ideales. ¿Qué representa la llegada de dicho elemento en la película? Adoptando la interpretación más convencional, la presencia del monolito significa el advenimiento de la capacidad de idear, de la facultad que tenemos los humanos de generar imágenes que nos permitan elaborar nuevas formas de relacionarnos con el mundo. Esta nueva facultad trae como consecuencia, en este relato de ficción, un mayor poder de sobrevivencia de un grupo de primates por sobre otro, situación que puede ser entendida como el primer logro del intelecto por sobre el instinto.

He presentado este ejemplo para destacar dos rasgos que se vislumbran como característicos del pensamiento humano vinculados estrechamente con el tema de este trabajo. En primer lugar, me referiré a lo que denominé el advenimiento de la capacidad de idear. Quien ha visto la película recordará una escena donde un primate golpea huesos y luego se muestran imágenes del mismo primate golpeando y aniquilando otros animales, como si fuese una proyección de actos futuros. Más allá de la ficción que impregna la historia, es rescatable la claridad con la que se muestra el salto en que el primate vincula dos planos de la experiencia parecidos pero no iguales, y transfiere conductas desde un plano al otro: de golpear huesos accidentalmente a golpear otros animales intencionadamente. Si se supone que ese proceso está mediado por mecanismos inferenciales - entiéndase por eso, mecanismos no meramente conductuales de acción y reacción o fruto del azar - se estaría en presencia de una instancia primitiva de Razonamiento Basado en Modelos. Por supuesto, una vez explicado qué es un Razonamiento Basado en Modelos (RBM), esta aseveración cobrará pleno sentido. Adelanto que esto radicaría en la capacidad que hipotéticamente adquirió el primate para establecer mentalmente una correlación entre dos situaciones de su experiencia y crear, a partir de eso, una representación mental que le permitió concluir que las acciones ejecutadas en cierto contexto lo son también en otro. Este caso en particular ejemplifica una forma de razonamiento analógico, que constituye en ciertos casos uno de los pilares del RBM.

En segundo lugar, el autor de la obra cinematográfica al combinar las dos escenas descritas al principio por medio de una elipsis (la del hueso lanzado al aire por el primate y la de la nave surcando el espacio exterior), lleva al espectador a vincular dos momentos distintos de la humanidad estableciendo tácitamente un criterio para juzgar la evolución del hombre desde la óptica del desarrollo de la tecnología. Esto lo hizo mostrando, en un principio, cómo los primates fueron protagonistas del advenimiento del uso de herramientas y, en un salto al futuro, conduciéndonos a inferir que lo que significó el hueso para la vida del primate, es análogo a lo que las naves espaciales son para el hombre contemporáneo. Esta analogía da origen a un criterio para entender a la humanidad en virtud de su relación con la tecnología. La analogía en sí no es ni exhibe explícitamente este criterio, pero quien la reconoce llegará a comprenderlo, por medio de la generación en su mente de la idea de la humanidad subyacente en la analogía. Esta idea de humanidad, que refleja la forma de dar lectura a nuestra historia sugerida por la película en virtud de la relación del ser humano con la tecnología, puede ser entendida como una representación mental modélica que además de contener una determinada comprensión de los hechos, nos permite emitir juicios y realizar inferencias. A través del desarrollo de este capítulo explicaré más específicamente en qué consisten dichas representaciones y su relación con el razonamiento, además me referiré al rol particular que tienen las analogías, dando cuenta de la conexión entre RBM y el uso de analogías (sección 1.4.2.).

El soporte fundamental de esta tesis consiste en que la capacidad para razonar sobre la base de modelos, ilustrada por medio de la realidad/ficción del ejemplo anterior, es central para ejecutar las tareas de razonamiento humano y sobre todo aquellas que implican la elaboración de concepciones novedosas. En lo que sigue me propongo establecer un marco teórico que permita dilucidar qué se entenderá por *modelo* y *RBM*. Como señalé, para hacer esta exposición tendré en cuenta como principales referentes las ideas sostenidas por Philip Johnson-Laird, quien ha dedicado su vida como investigador al estudio de los aspectos cognitivos implicados en el razonamiento humano, y Nancy Nersessian, quien ha desarrollado una interesante teoría que vincula el estudio de la psicología del razonamiento con el análisis de la historia de la ciencia, específicamente sobre la generación de nuevos conceptos al interior de las ciencias. La exposición que sigue se articula sobre el análisis

del tipo de representación que es un *modelo mental* conforme a la teoría de Johnson-Laird, y el realizado por Nersessian en el contexto del estudio del cambio conceptual, sobre como opera el modelado mental en el razonamiento aplicado en los procesos creativos en ciencias.

1.1.2. Una diferencia fundamental: Sobre la oposición entre la visión tradicional de razonamiento y el RBM.

Sostener que el RBM es una alternativa viable para entender el razonamiento humano significa concordar con un marco explicativo distinto al que se funda en la visión tradicional imperante desde los tiempos de Aristóteles y que se ha extendido con invaluable avances y sofisticaciones hasta mediados del siglo XX. Esta perspectiva se caracteriza por una concepción particular acerca de la relación entre el razonamiento y la lógica. En lo que sigue me propongo examinar en general las diferencias que demarcan ambas formas de explicar el razonamiento.

Aristóteles presentó hace ya más de dos milenios una concepción de razonamiento que distinguía aspectos de contenido de aspectos formales o estructurales del razonamiento, algo que hoy en día diferenciaríamos como aspectos sintácticos y semánticos. El silogismo aristotélico refleja de manera muy sencilla cómo podemos abordar el estudio de la estructura de un razonamiento sin tener en cuenta lo que significan las aserciones que lo componen. El silogismo: “Todo S es P. Todo P es Q. Por lo tanto, S es Q” constituye una forma de razonamiento deductivo válido, donde la conclusión se infiere necesariamente de las premisas expuestas, es decir, no añade información nueva, sino que lo que afirma es una consecuencia directa de lo que se sostiene en las premisas. Es central a esta concepción el considerar que, independientemente de lo que se afirme, la aplicación de las reglas de inferencia que dan forma al razonamiento es lo que determina si el razonamiento es correcto o no, como en el ejemplo del silogismo deductivo. De este modo, si se expresa: “Todo partidario de la revolución es inconformista” y “Todo inconformista es idealista”, es válido afirmar que “Los partidarios de la revolución son idealistas”.

Lo anterior tiene el propósito de ilustrar brevemente una característica que define el marco explicativo clásico sobre el razonamiento desde la lógica y que se focaliza en el estudio de las reglas o leyes que constituyen los mecanismos para realizar inferencias válidas. Desde esta óptica, la competencia argumentativa de un sujeto puede ser entendida en términos de su capacidad para operar con dichas reglas. Desde los tiempos de Aristóteles hasta ahora ha corrido bastante agua bajo el puente, la lógica ha tenido múltiples desarrollos hasta el día de hoy, pero la idea base de la concepción clásica de razonamiento que se concentra en las reglas de inferencia, más que en el contenido, permanece casi inalterada. Es innegable la contribución de dicha perspectiva. Gracias a sus desarrollos se sustenta el advenimiento y progreso de la computación, y más precisamente de la Inteligencia Artificial. No obstante, este enfoque resulta incompleto para explicar cómo se produce el razonamiento humano en contextos reales.

Los dardos de los proponentes del RBM apuntan a que el razonamiento no se encuentra necesariamente ligado a la aplicación de reglas formales de inferencia, sino que existe una relación estrecha entre el razonamiento y las representaciones generadas por medio de la percepción y la imaginación. Por ejemplo, al leer una novela o ver una película, se elabora una suerte de imagen o esquema de la situación, que se complejiza a medida que incorporamos más información. Este no contiene en detalle cada momento, cada aspecto presente en la obra literaria o cinematográfica, sino una noción sobre los elementos que el

observador considera relevantes de la historia y que permiten darle sentido. En palabras más precisas, se crea una representación mental de la situación que se usa como base para su comprensión, un *modelo mental* de ésta. Este modelo es la base para realizar proyecciones sobre el actuar futuro de los personajes o el posible desenlace de la historia. Grandes desenlaces del cine o la literatura se podrían explicar por el juego en el que se sumerge al espectador haciendo ejercicio de esta capacidad humana para representarse las situaciones mentalmente y predecir: sugieren una interpretación de la historia, el lector o espectador crea su modelo de la misma, realiza sus inferencias, y de pronto, se enfrenta a un final que no estaba dentro de sus perspectivas. Pienso, siguiendo con los ejemplos cinematográficos, en las películas *Los Sospechosos de Siempre* y *Sexto Sentido*.

El RBM constituye un enfoque sobre el razonamiento que sostiene que las herramientas principales para la ejecución de inferencias son los modelos y las prácticas que conducen a la elaboración de los mismos, no la aplicación de reglas lógicas para la inferencia. Prescinde de la postulación de la existencia de un aparato mental que se encargue de procesar la información a través de reglas lógicas, ya que no se considera como algo necesario, ni suficiente para comprender los procesos de razonamiento humano. El marco teórico que define el RBM, se caracteriza por considerar más determinantes los aspectos contextuales y semánticos al momento de razonar. En lo que sigue expondré más en detalle que significa esto.

1.1.3. Antecedentes teóricos y posiciones fundamentales del RBM.

Ya han corrido alrededor de cuatro décadas desde que P.N. Johnson-Laird inició sus investigaciones sobre modelos mentales. Desde el ámbito de la psicología cognitiva su principal contribución ha sido desarrollar, combinando la especulación con la investigación experimental y la implementación computacional, una teoría donde se propone dar cuenta del rol que cumplen los modelos mentales en la forma como razonamos. En una de sus obras más importantes publicada en 1983, titulada *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*, Johnson-Laird expone en detalle su teoría sobre modelos, la cual sigue siendo enriquecida hasta el presente. Su obra ha sido seminal para la investigación sobre RBM en ciencia cognitiva y constituye uno de los más importantes referentes de las investigaciones que buscan vincular la teoría de modelos con la educación.

La teoría de los Modelos Mentales sostenida por Johnson-Laird enfatiza que es la exploración e interpretación de la información contenida en una situación lo que determina principalmente las inferencias ejecutadas por un razonador. Sostener que la aplicación de reglas lógicas al razonamiento es lo que hace posible la ejecución de inferencias válidas ciertamente ha contribuido al desarrollo de teorías sobre como ocurren ciertos procesos de inferencia, pero su poder explicativo sobre cómo opera el razonamiento humano en general es algo que se puede poner en cuestión. Sobre todo porque desde un punto de vista psicológico, sostener que el razonamiento humano funciona sobre la base de aplicación de reglas lógicas, deja abierta la pregunta acerca de en qué momento los humanos adquieren dichas reglas, si son innatas o más bien si se adquieren a través de la educación.

Sobre el primer punto. Si se sostiene que las reglas de inferencia son innatas, no tendrían por qué ocurrir errores de inferencia en los humanos. Si bien es cierto que los bebés son capaces de realizar ciertas tareas de suma, o realizar algún tipo rudimentario de inferencias, no existe hasta el momento una prueba de que los humanos tengamos al nacer una capacidad operativa lógica. El único recurso sería quizá plantear una psicología

de tinte platónico donde se sostenga que dichas reglas de inferencia están impresas en nuestro intelecto al nacer, solo que no lo notamos y la educación sería el ejercicio de tomar conciencia del conocimiento de estas reglas. Ahora, sobre el segundo punto, si las reglas se adquieren a través de la educación, no hay necesidad para postular que éstas sean las únicas vías de inferencia para el humano. Esto sería tan absurdo como plantear que quien no ha tenido un curso de lógica en su vida, sería incapaz de realizar inferencias correctas. Pero el caso es que en la práctica las inferencias de muchas personas sí son correctas aunque carezcan de conocimiento sobre las reglas lógicas.

Dando un paso al lado de la disputa sobre si el razonar puede estar basado en reglas lógicas instaladas en la mente o no, es importante destacar que esto no apunta a desestimar absolutamente el rol de las reglas lógicas en el razonamiento. Lo que se persigue es constatar que existen otros factores relevantes para considerar en una explicación sobre el proceso a través del cual razonamos y que la reconstrucción lógico proposicional no es la única alternativa - y en muchos casos quizá tampoco la mejor - para dar cuenta del potencial inferencial humano. Este punto se puede graficar con un hecho que llama la atención de Johnson-Laird: la tendencia de los humanos de cometer errores al razonar. Se ha constatado que en situaciones reales nos mostramos más sensibles al contexto y a la interpretación que hacemos de la información recibida en mixtura con nuestra concepción de mundo o conocimientos previos. Esto determina el tipo de conclusiones que extraemos y el que en variadas ocasiones realicemos inferencias erróneas sobre el curso de las situaciones. Esto también explica las discrepancias en la evaluación de la información que pueden tener diversos razonadores enfrentados a una misma situación. Por ejemplo, alguien que sufre de alguna clase de fobia, interpretará como peligrosos elementos de su experiencia sin que sean daños potenciales previstos por otros razonadores que no padecen este mal. En este caso el sujeto ve determinado su razonamiento por factores de internos, que se traducen en una sobreestimación de los peligros a los que se verá expuesto y que configuran su particular representación de la situación. El *modelo mental* que se confecciona a partir de la lectura que se hace de la realidad tiene directa influencia sobre el proceso de razonar. Desde este punto de vista, lo que diferenciaría a Sherlock Holmes de un investigador cualquiera, no es precisamente su capacidad de procesamiento lógico, sino su facultad para ser sensible a la información y a partir de eso detectar nexos causales donde otros no lo hacen.

Un experimento clásico en esta línea de pensamiento es la tarea de selección de cartas de Wason. Wason, según destaca Johnson-Laird (1990), a través de este experimento mostró cómo el *contenido semántico* presentado en un problema puede afectar en una tarea de razonamiento. El problema a resolver es el siguiente:

Se presentan cuatro tarjetas con solo una de sus caras visible. Se indica que cada tarjeta tiene una letra en una de sus caras y un número en la otra. Las caras visibles muestran respectivamente las letras "A", "B", y los números "2" y "3". Se debe decidir qué tarjetas hay que voltear para determinar la verdad o falsedad de esta regla: *Si hay una vocal en una cara de la tarjeta, entonces hay un número par en la otra cara.*

Al solicitar a un grupo de personas realizar esta tarea los investigadores han constatado la fuerte tendencia a voltear aquellas cartas que pudiesen confirmar el enunciado. Es decir, se decide mayoritariamente voltear, primero la carta "A" y en segundo lugar la combinación de las cartas "A" y "2". Esto, según los investigadores es una muestra de lo relevante que es la manera como está enunciado el problema. La solución planteada por la mayoría se apega directamente a lo dicho en el enunciado del problema. Se busca corroborar la información contenida explícitamente en la regla a evaluar. Además se aprecia la influencia

del *sesgo confirmatorio*, en otras palabras, la propensión que tienen los razonadores a buscar información que se acomode al modelo de la situación que han formado en su mente. Ahora bien, el modelo en este caso es una representación mental del problema donde aparecen como relevantes solo los aspectos explícitos en el enunciado del problema. La solución correcta al problema consiste en dar vuelta las cartas “A” y la “3”. Girar la carta “A” arrojaría información directa sobre la verdad o falsedad de la regla, mientras que la carta “3” otorgaría evidencia inmediata sobre la falsedad de la regla, si tuviese en su contracara una vocal. Las otras dos opciones (voltear “2” o “B”) son irrelevantes para constatar si la condición establecida en la regla es verdadera o falsa.

La tarea de la selección de cartas de Wason muestra que la interpretación de la información determina la clase de conclusiones que se extraen al razonar, por una parte, pero, por otra, que la tendencia natural a buscar información que avale una aseveración (definida como sesgo confirmatorio), orienta la búsqueda de la solución del razonador. Esta clase de error no puede justificarse por una mera falta de operatividad lógica.

Johnson-Laird considera a su teoría de los Modelos Mentales como heredera de las ideas de un conjunto de pensadores que desde finales del S. XIX sentaron las bases para su formulación. Johnson-Laird reconoce como anticipadores de su teoría a varios pensadores que, en el siglo XIX, principalmente en el terreno de la física, otorgaron un papel central a los modelos en la elaboración y explicación de sus teorías. Así por ejemplo, este autor (Johnson-Laird, 2004) rescata la importancia que tenía para Lord Kelvin la construcción de un modelo mecánico en la elaboración de su teoría electromagnética, también el hecho de que Maxwell haya tenido en mente un modelo mecánico al desarrollar su teoría acerca del campo electromagnético, y el planteamiento defendido por Ludwig Boltzmann - cuya principal contribución fue en el área de la termodinámica - acerca de que todas nuestras ideas y conceptos son sólo imágenes internas. La importancia que tuvieron los modelos en la física del siglo XIX radica, según el autor, en que jugaron un papel central en el proceso creativo de los científicos de la época, resultando en la elaboración de nuevos conceptos que contribuyeron a reformular teorías preexistentes. Es precisamente la constatación de la importancia que tienen los modelos en la investigación científica lo que además inspira la investigación más reciente sobre RBM.

El principal impulsor intelectual reconocido por Johnson-Laird de la teoría de los modelos mentales es Charles Sanders Peirce (Johnson-Laird, 2004), específicamente en lo que concierne a su concepción sobre las propiedades de los signos. Peirce reconoce tres rasgos distintivos de los signos: ser *icónicos*, *indexicales* y *simbólicos*. La primera propiedad, *iconicidad*, hace referencia a que los signos pueden representar entidades en virtud de la semejanza estructural que tengan con éstas. Así la imagen visual de un auto es icónica respecto del auto que representa. La segunda propiedad, *indexicabilidad*, se refiere a la representación de una entidad en virtud de una conexión física directa, tal como apuntar a un objeto para referirse a éste. La tercera, el *simbolismo*, alude a la cualidad de los signos para representar entidades en virtud de una regla establecida por convención. Tal es el caso de la representación verbal de una situación donde se establece un nexo entre signos lingüísticos y objetos del mundo.

Otro antecedente de la teoría de los modelos mentales citado por Johnson-Laird es la teoría del significado propuesta por Ludwig Wittgenstein en el *Tractatus-Logico-Philosophicus* (1921). En dicha obra Wittgenstein sostiene una teoría figurativa del significado que se basa en una concepción metafísica que propone la existencia de una conexión estructural entre el pensamiento y mundo. Esto quiere decir que existe una forma que comparten pensamiento y mundo, la que Wittgenstein concibe como “forma lógica”. El

isomorfismo entre pensamiento y mundo posibilita la producción de figuras (pictures) de los hechos a través del lenguaje. Las figuras son definidas como modelos de la realidad que expresan la interrelación entre pensamiento y mundo. Las figuras que elabora el pensamiento por medio del lenguaje reflejan la capacidad del pensamiento de operar conforme a relaciones de proyección, donde los elementos de la figura están combinados de tal manera que representan cómo las cosas están combinadas entre sí efectivamente. Esta capacidad de crear figuras en base a un isomorfismo entre pensamiento y mundo es una característica esencial del pensamiento. La contribución de Wittgenstein a la teoría de los modelos mentales consiste en destacar la actividad del pensamiento que elabora figuras de los hechos en virtud de una *conexión estructural* entre los contenidos del pensamiento y el mundo. Ese postulado es fundamental para la teoría sobre modelos mentales, dado que éstos, como se verá en lo que sigue, se definen principalmente por su semejanza estructural con el mundo.

Johnson-Laird (1983, 2004, 2005) considera a Kenneth Craik el principal impulsor de la idea de que los modelos constituyen un elemento central para el pensamiento humano. Craik sostiene que la propiedad principal del pensamiento es su capacidad para predecir eventos. Dichas predicciones se sustentan en la manipulación de modelos que han sido generados en un proceso de traducción de la información recibida desde entorno. Para Craik un modelo es un paralelo o *imitación* de la realidad, una *simulación* mental de los estados de cosas. Lo que convierte a los modelos en la principal herramienta para pensar el mundo, es la organización de sus componentes de manera tal que se replica y se corresponde con la estructura de los procesos, fenómenos y objetos reales de los cuales es imitación. Un modelo muestra su efectividad predictiva de eventos en la medida que *opera* de forma semejante al proceso del cual es un paralelo. Más allá de una mera reacción frente a las circunstancias o poner en juego un conjunto de conductas heredadas o condicionadas, el ser humano habita el mundo y se relaciona utilizando la planificación, la imaginación, y la creatividad, habilidades que están, desde la óptica que se propone, directamente relacionadas con el uso de modelos mentales. El razonamiento simulativo y anticipatorio otorga esta ventaja evolutiva sobre el entorno. A través de la generación y manipulación de modelos es posible programar acciones futuras y modificar pautas de conducta. Sobre si esta capacidad es exclusiva de los seres humanos, es difícil objetar algo. La facultad para utilizar y crear modelos podría quizá defenderse como privativamente humana considerando que en su origen se encuentra estrechamente vinculada con la capacidad de pensar sobre la base de representaciones. Si el tema se piensa en términos del sustrato cognitivo probablemente sólo la mente humana estaría posibilitada para este tipo de procesamiento. Más allá de esta discusión, basta con considerar como punto de partida la hipótesis “minimalista” que defiende Nersessian:

“En ciertas tareas de resolución de problemas, los humanos razonan construyendo y manipulando un modelo mental icónico de las situaciones, eventos y procesos en la memoria de trabajo” (Nersessian, 2008, p. 99).

Nersessian toma como punto de partida, no el hecho de que los modelos mentales sean la base de todo razonamiento ni que éstos sean de exclusividad humana, sino que constata la existencia de tareas donde efectivamente la creación y manipulación de modelos es un aspecto crucial para la resolución de problemas en los humanos.

De lo anteriormente expuesto existen tres rasgos que se pueden identificar como básicos en la concepción de modelo y que evidencian la influencia de los pensadores antes mencionado: la *iconicidad*, el *isomorfismo* y la *simulación*. La *iconicidad* como una característica central de los modelos - destacada por Nersessian en la cita anterior - es el

rasgo fundamental que determina el tipo de representación que constituyen los modelos a diferencia de otra clase de representaciones. El *isomorfismo* es la propiedad que tiene un modelo en relación con el fenómeno del cuál es paralelo; es, por así decirlo, el criterio básico para determinar que el modelo se ha construido correctamente, permitiendo establecer relaciones de proyección entre lo representado y aquello sobre lo cual se razona. La *simulación*, por otra parte, se refiere al proceso cognitivo que sustenta la generación mental de los modelos. Más adelante en la sección. 1.3.4. me referiré específicamente a este último aspecto. Me concentraré en lo que queda de esta sección a examinar la relación entre las nociones de iconicidad e isomorfismo.

La *iconicidad*, se refiere a la cualidad que tienen los modelos para representar entidades a partir de puntos de conexión entre el representante y representado. Esta noción es posible de engranar con la de isomorfismo dado que sobre este se sostienen las relaciones de proyección entre un dominio y otro (el modelo y la fenómeno sobre le cuál se razona). El isomorfismo determina los puntos de conexión que definen a una representación como icónica. Johnson-Laird se refiere a la iconicidad como una de las cualidades más relevantes en la constitución de un modelo (2005). La iconicidad es la cualidad que tienen los modelos mentales para representar aspectos complejos de la realidad en base a un isomorfismo. Específicamente la iconicidad se cumple en un modelo mental porque tiene una estructura que está en correspondencia con la de aquello que representa, es decir, porque existe un *isomorfismo* entre el modelo y el fenómeno que representa. El isomorfismo se refiere entonces específicamente a la forma cómo se estructuran los componentes de un modelo, o cómo interactúen entre sí, guardando una relación de semejanza con el fenómeno que se modela. Los modelos mentales se constituyen de esta manera como representaciones que capturan esa estructura, exponiendo a través de su isomorfismo la manera como se configura el fenómeno representado.

Para que quede más clara esta idea considérese el siguiente ejemplo. Para la construcción de una casa hay muchos aspectos a tener en cuenta, desde la compra de materiales hasta la decoración final. Pero un problema central es el diseño estructural de la casa misma, la distribución de las habitaciones, el espacio asignado a cada una, si tendrá una planta o dos, la ubicación de las ventanas, etc. Para resolver este problema se dibujan planos donde se representan espacialmente, a escala, cada una de las partes que compondrán la casa. El plano diseñado en la mente del profesional encargado de la tarea, y ejecutado con el apoyo de medios externos, es la representación modélica. La noción de iconicidad en este caso se refiere a que esta representación – el plano - se compone de elementos que están en relación estructural directa con la casa real a construir, cada elemento del plano proyecta un elemento de la casa. En esto consiste el isomorfismo entre la representación y lo representado, que permite transferir soluciones desde el ámbito del modelo hacia el fenómeno sobre el cual se razona, en este caso, el diseño de una casa.

Iconicidad e isomorfismo son dos características básicas de los modelos, las que no pueden entenderse como separadas, pues es en virtud del isomorfismo que la representación se constituye como icónica: una representación que exhibe semejanzas estructurales de relevancia para el razonador. Es decir, en una primera aproximación, que considera los antecedentes de la teoría de los Modelos Mentales y el RBM, los modelos son representaciones icónicas basadas en un isomorfismo que posibilita las relaciones de proyección entre el modelo y aquello sobre lo cual se razona.

1.1.4. El RBM como respuesta al problema de explicar la creatividad científica.

Según Nersessian (1999, 2002, 2008) las prácticas de modelado constituyen métodos generativos de cambio conceptual en el ámbito de las ciencias. Cambio conceptual significa, la ocurrencia de un viraje en la manera de entender la realidad, que da como resultado la creación de nuevas concepciones o en la modificación de aquellas ya existentes. Estas nuevas categorías son el reflejo de una forma renovada de comprensión y teorización producidas por estrategias de razonamiento a través de modelos. Por prácticas de modelado se entienden aquellas actividades que están involucradas en la elaboración de modelos y en la generación de conocimiento a través de los mismos. El interés central de Nersessian es mostrar cómo efectivamente ocurre el cambio conceptual en las ciencias en el contexto de las prácticas de modelado. Es decir, cambiar el foco desde el estudio de los resultados de la actividad científica y de la reconstrucción teórica y lógica del descubrimiento hacia la investigación de los procesos que conducen a la producción de teorías y nuevas concepciones científicas. La metodología en la que se lleva a cabo la línea de investigación desarrollada por Nersessian mezcla la teorización con el análisis de estudios etnográficos e historiográficos. Este método se denomina histórico-cognitivo, porque sitúa el estudio psicológico de la cognición aplicada a las prácticas de cambio conceptual en el entorno cultural en el que se desenvuelven. El RBM desde la óptica de Nersessian constituiría la principal vía para la producción de conocimiento en el ámbito de las ciencias. Adelanto que la repercusión que tiene esta idea para la propuesta de aplicación del RBM en educación, que se expondrá y analizará en el segundo capítulo, se funda en sostener que esta forma de entender la actividad científica puede hacer de la enseñanza de las ciencias una actividad más ajustada a aquellas habilidades involucradas en la generación de conocimiento científico.

Nersessian comparte con Johnson-Laird la perspectiva crítica sobre la visión tradicional del razonamiento. Destaca que la filosofía que estudia el razonamiento científico ha considerado solo como legítima la identificación entre razonamiento y argumento expresado en forma proposicional y estructurado según una lógica concebida como correcta. Su diagnóstico señala que dicha concepción ha fracasado a la hora de dar cuenta de la generación de nuevas concepciones en ciencia, precisamente por ignorar un factor fundamental: que las prácticas científicas de descubrimiento e innovación constituyen procesos históricos complejos y contextualizados.

Nersessian plantea que para comprender el fenómeno de la creatividad en las ciencias es preciso ampliar nuestra concepción sobre razonamiento, más allá de los análisis formales referidos a la inducción, a la deducción e incluso la abducción. El cambio conceptual no es reducible a la perspectiva clásica del razonamiento dado que ésta, al concentrarse en el examen analítico de la secuencia lógica de los enunciados en los que se formulan teorías o hipótesis científicas, se escapa de la efectiva comprensión del proceso concreto en el que surgen nuevos conceptos. Esto supone la consideración de los contextos de descubrimiento, la particularidad de la información sobre la que se razona y cómo influyen los conocimientos de base de cada investigador en el tipo de asociaciones que establece, por mencionar algunos ejemplos. El análisis tradicional se concentra en el estudio de la lógica del descubrimiento, entendida como la reconstrucción de los pasos inferenciales según los criterios de una determinada estructura lógica, dejando de lado aspectos psicológicos implicados en el proceso de la creatividad científica. Como ejemplo clásico y sencillo para ilustrar esto pienso en las circunstancias que condujeron a Arquímedes a postular las leyes de la flotación y gravedad específica.

Cuenta la historia que el rey Hierón solicitó a Arquímedes averiguar si una corona que encargó confeccionar efectivamente había sido hecha con oro puro, sin combinarlo con otros metales como el cobre y la plata. Arquímedes debía averiguar esto sin intervenir la corona, por supuesto. Arquímedes sabía que el oro es un metal más pesado que el cobre y la plata, es decir, que éstos al ocupar el mismo volumen que el oro, pesarían mucho menos. Pero, ¿Cómo calcular el volumen exacto de la corona de oro, sin derretirla? Después de meditar y darle varias vueltas al problema, fue mientras se sumergía en una tina cuando dio con la pieza clave del acertijo. Eureka! Fue la expresión declarada cuando descubrió que el agua que se expulsaba al sumergirse él en la tinaja podría ser equivalente al volumen de su propio cuerpo sumergido. Es así como ideó la manera de hacer una relación entre el peso y volumen sumergiendo la corona en agua. La historia tuvo un desenlace triste para el orfebre que confeccionó la corona. Ésta no había sido hecha con oro puro y fue ordenado ejecutar por el rey.

Este ejemplo ilustra la existencia de elementos inaprensibles para el estudio de la lógica y que están imbricados en el proceso del descubrimiento: ¿cómo determinar el origen de las asociaciones que establece el investigador?, ¿cómo se selecciona desde el entorno la información que será de relevancia para el descubrimiento? Quizá se podría afirmar que la fuente de la creatividad es en principio inexplicable, inaccesible, algo mágico que ocurre súbitamente, o tal como los conductistas entendían la mente, es parte de una “caja negra” inaprensible para el estudio científico. Pero Nersessian sostiene que la creatividad puede ser comprendida, tal vez no en lo que concierne a la génesis misma de la primera idea en un entorno casual, pero sí de las asociaciones que se establecen en la mente del investigador como punto de partida y cómo éstas van configurando una situación de descubrimiento y creación. La propuesta de Nersessian consiste en dar cuenta del cambio conceptual, el proceso creativo en las ciencias, a través de la investigación dirigida hacia las prácticas de modelado concretas sobre las cuales se articula el razonamiento científico, entendiendo que dichas prácticas son el sustento principal para la generación de nuevas concepciones en las ciencias.

Esta perspectiva tampoco comparte la explicación que sitúa a la abducción reconstruida de manera lógico-proposicional como el proceso inferencial propio de la actividad creativa en ciencias. Esta forma de entender el cambio conceptual, propuesta principalmente estudiada y defendida por Peirce, dejaría igualmente oscura la naturaleza del proceso de razonamiento creativo. La abducción así entendida se enmarca en el enfoque tradicional de razonamiento y se define básicamente por su diferencia con la deducción y la inducción. La abducción es un tipo de inferencia que amplía la información contenida en las premisas, tal como lo hace la inducción, pero parte del postulado de una regla de carácter general, como la deducción, solo que ésta es provisional lo que convierte a la conclusión de la inferencia abductiva en algo igualmente provisional.

Tomando el mismo caso del ejemplo anterior, una reconstrucción siguiendo la forma lógica de la abducción sería más o menos así:

- Todos los cuerpos dependiendo de su masa al ser sumergidos en agua producirán una variación en el nivel de esta última independiente de volumen que tengan.
- La corona del Rey tiene una determinada masa de acuerdo al metal de la que está hecha.
- El nivel del agua variará según su composición.

En este caso la primera premisa es la regla de carácter provisional que es la que aporta con la información crucial para llevar a cabo la inferencia. Así planteado este razonamiento

se muestra bastante sólido y coherente, no obstante hay que destacar que la información contenida en la primera premisa no se sostiene como una verdad necesaria. La primera premisa refleja la idea novedosa que nace en la mente de Arquímedes y que le permite dar con la solución al problema. Pero es en su formulación donde efectivamente radica el proceso creativo. ¿Cómo explicar el origen de esta idea?, ¿qué proceso condujo a este científico de la antigüedad a relacionar aspectos de su vida cotidiana con nociones de la física?, ¿qué proceso de razonamiento habría mediado la generación de una hipótesis como esa? La reconstrucción lógico-proposicional no es útil para responder estas preguntas.

La abducción, insisto, en su reconstrucción proposicional, (porque hay una acepción más general del término que llama “abductivo” al razonamiento que conduce a la generación de hipótesis) no es considerada como una aproximación suficiente para explicar la creatividad en las ciencias, porque no da cuenta de ésta, sino que reconstruye el proceso inferencial una vez que se ha planteado una hipótesis novedosa. Nersessian propone un cambio del foco de atención hacia responder estas preguntas: ¿qué proceso conduce a la formulación de una hipótesis?, ¿qué proceso conduce a la mente hacia la generación de explicaciones y conceptos novedosos en las ciencias?

El centro del problema sobre el cambio conceptual está en investigar cómo se forman los nuevos conceptos y cómo se relacionan éstos con los ya existentes. La idea base es cambiar el foco de interés en el estudio del producto de la actividad científica hacia los métodos, específicamente hacia los tipos de razonamiento y estrategias de pensamiento que se utilizan para generar conocimiento. Esto significa dejar de investigar sobre la reconstrucción racional y la formulación teórica final de los resultados de una investigación científica, sino indagar en las acciones que fueron parte del proceso de razonamiento que condujo al cambio conceptual. Nersessian propone que existen tres prácticas principales generativas de cambio conceptual, estas son: el modelado analógico, el modelado visual y los experimentos mentales (Nersessian 2008). En términos generales, se refieren a prácticas de razonamiento que se articulan a través de la producción de estructuras representacionales modélicas que sirven para examinar fenómenos desde una óptica novedosa.

El pilar fundamental del enfoque propuesto por Nersessian, denominado método histórico-cognitivo, consiste en reposicionar el rol de los modelos en el razonamiento científico, los cuales, producto del auge del logicismo en las explicaciones sobre creatividad científica, habían sido relegados por mucho tiempo a una función meramente expositiva o ilustrativa, y no fueron vistos como algo esencial para el proceso creativo, hasta que surgieron los primeros enfoques históricos y cognitivos que incorporaron la noción del modelo a la discusión sobre la ejecución del proceso mismo de razonamiento (Bailer-Jones, 1999; Suárez, 1999). La posición de Nersessian se enmarca en este contexto, evidenciando que las prácticas de modelado son cruciales en la generación de nuevas concepciones científicas. Bastante ilustrativo a este respecto es su examen de los registros de las investigaciones de Maxwell (Nersessian, 2008).

1.2. Representaciones modélicas: Definición y caracterización de los modelos.

Las secciones previas se han referido al rol que los modelos desempeñan en una concepción del razonamiento amplificadora y flexibilizada. En este punto cabe responder la interrogante sobre qué específicamente son los modelos, o, más precisamente, qué se entenderá por modelo en el contexto de la perspectiva del RBM. Esto implica hacerse cargo del problema desde un punto de vista puramente ontológico, es decir, indicar qué clase de entidad es la que se denomina modelo. Además, hay que considerar los aspectos semánticos, para establecer qué información acerca del mundo contienen los modelos. Por último, deben tenerse en cuenta los aspectos epistemológicos, para determinar específicamente qué rol cumplen los modelos en la producción del conocimiento.

En un sentido muy amplio los modelos son representaciones, creadas por el ser humano como medio de expresión de sus pensamientos sobre los asuntos acerca de los cuales razona. El pensamiento humano tiene una particularidad que impregna y dota a su forma de habitar el mundo de un carácter distintivo del resto de las especies: la capacidad que tiene de procesar la información del entorno a través de representaciones. Para el humano la relación de conocimiento no es una operación directa entre los objetos del mundo y él mismo. Tal como, por ejemplo, Piaget concibe la relación de los niños con el entorno en el estadio sensorio-motor del desarrollo - una etapa temprana del desarrollo intelectual - caracterizada por una interacción directa con las cosas sin intervención del lenguaje ni planificación alguna. El ser humano se representa la realidad, introduce mediadores, símbolos, que transportan información sobre el mundo desde sus capas más simples hasta las más complejas visiones de mundo. Una obra visual, por ejemplo, registro de una cultura ancestral, se encuentra cargada de un simbolismo que es reflejo de la visión de mundo propia de la época. Las representaciones hieráticas de la figura humana en el arte egipcio distan mucho de la visión dialéctica de claro oscuro de los pintores y artistas del barroco, reflejo de una cosmovisión cargada de contrapuestos propia de la época de los siglos XVII y XVIII. ¿Qué tienen que ver los modelos con todo esto? Los modelos son medios para representar la realidad en la mente, que se exteriorizan a través de los actos, decisiones y creaciones humanas. Partiendo de la base de que el pensamiento humano procesa la realidad a través de representaciones, los modelos pueden ser definidos como un conjunto complejo de elementos, que dispuestos en una determinada estructura, son portadores y reflejo de una determinada representación simulada del mundo.

Al indicar que los modelos son representaciones se destaca la propiedad que tienen de simular un cierto estado de cosas a través de un lenguaje particular: proposicional, diagramático, por ejemplo. La base para su configuración está dada por los constreñimientos propios de la estructura de los estados de cosas en los que se fundamenta. Con esto aludo a lo que anteriormente se definía como iconicidad en los modelos sostenida en un isomorfismo.

Un modelo no es una copia mimética de la realidad, aunque la capacidad de imitación de los fenómenos percibidos se considera como una habilidad básica para la elaboración de modelos (Nersessian, 2008). Por imitación se entiende en este contexto la capacidad para representar los elementos que configuran una situación sin ser una copia literal de los mismos. Un modelo es una representación mental que conserva aspectos esenciales de la realidad que representa, pero no es una reproducción. Un modelo es una creación que guarda una relación con la realidad que representa, pero sin ser una copia exacta de la misma. Así, pueden existir modelos que guarden una semejanza muy estrecha con la realidad que representan, mientras que otros no. Por ejemplo, el plano del recorrido del metro es bastante semejante a cómo desde una perspectiva aérea se puede percibir efectivamente el curso de los recorridos. Otro caso es la representación que hace Freud

del inconsciente como flujos de fuerzas, pero es mucho más arbitraria que el ejemplo del mapa del metro.

Esto permite adelantar algo acerca del rol cognitivo de los modelos: si un modelo solo es copia de la realidad, este no tendría rol alguno en la creatividad humana, menos en la científica. Solamente consistiría en recargar en la memoria información capturada con anterioridad. Los modelos mantienen una relación de semejanza con la realidad, pero a su vez constituyen algo distinto, novedoso con respecto a ésta. Esto no significa que los modelos sean representaciones meramente resumidas de la realidad. Los modelos representan la realidad en un cierto respecto. Su simplicidad o arbitrariedad tienen una razón de ser. Los modelos son una forma de adentrarse en la comprensión de la realidad a través de una óptica que incorpora no solo elementos provenientes del fenómeno que se estudia, sino que incluyen además las concepciones propias de quien elabora el modelo y su forma particular de representar la información.

Para ilustrar este último punto, sobre la influencia de las concepciones propias en la elaboración de modelos examinaré la figura 1. En ésta se exponen dibujos realizados por niñas de 6 años donde se exteriorizan sus representaciones sobre como está configurado el esqueleto humano. A través de los dibujos se puede constatar que ellas cuentan con ciertas nociones sobre la composición esquelética del cuerpo humano, sus dibujos dan cuenta de cierto conocimiento de base común extraído de la experiencia directa (división de extremidades, relación cabeza-cuerpo). No obstante, se manifiestan amplias diferencias en la configuración de la estructura interna y detallada (la forma específica de los huesos, su articulación). Las representaciones evidenciadas en los dibujos ciertamente guardan una conexión de semejanza con la realidad en la que se inspiran, pero manifiestan claramente también que lo que cada sujeto recrea en su mente sobre un fenómeno varía según sus experiencias y conocimientos previos. E incluso, estos dibujos tampoco pueden ser juzgados como una exteriorización fiel de sus modelos mentales sino más bien son la proyección bidimensional que las niñas lograron realizar conforme a sus habilidades para dibujar. Este también es un factor importante en la elaboración de modelos. Retomando el punto anterior, estos dibujos no pueden ser entendidos como copias de una realidad. En efecto, dado que las niñas de 6 años que hicieron estos dibujos solo tienen nociones muy vagas sobre cómo es el esqueleto humano, tuvieron que construir un modelo sobre cómo lo imaginan a partir de su experiencia.

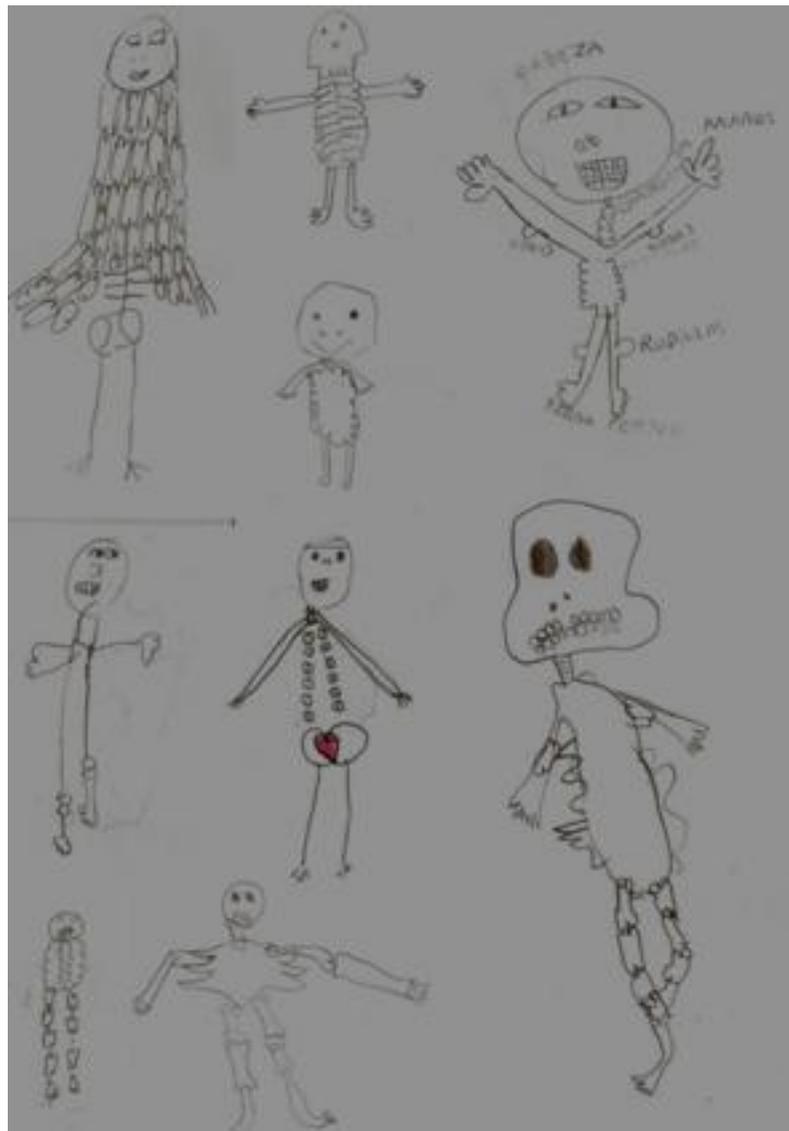


Fig. 1. Dibujos del esqueleto humano hechos por niñas de 6 años

¹ Johnson-Laird (1983, p. 3) y Nersessian (2008, p. 102) recurren a esta cita de Kenneth Craik para explicar qué son los modelos mentales:

“Por un modelo nos referimos a cualquier sistema físico o químico que tiene una estructura de relaciones similar a aquella del proceso que imita. Por estructura de relaciones no me refiero a una entidad no física y oscura que sustenta al modelo, sino al hecho de que es un modelo de trabajo físico que opera de la misma manera que el proceso del cual es paralelo, en los aspectos que se examinan en cualquier momento”.

Conectado con el punto recién expuesto, la cita destaca en qué sentido un modelo es una imitación. Con esto se vuelve a la relación de isomorfismo ya definida. Un modelo es una imitación porque las relaciones de los elementos que lo configuran tienen una conexión de semejanza estructural con el fenómeno sobre el cual se razona. Se destaca

¹ Estos dibujos fueron realizados por alumnas de 1ero básico de un colegio particular subvencionado. La instrucción que recibieron fue “Mostrar a través de un dibujo cómo se imaginan que es nuestro esqueleto”.

además que esta semejanza es primordialmente sobre la forma de operar del modelo en relación con lo que representa. Cuando se indica que es un modelo de “trabajo” se alude a esta característica. Es “físico” porque está referido directamente a la realidad física que representa, a la estructura de relaciones que se intenta comprender a través del modelo.

De la cita se extraen también otros puntos interesantes sobre la noción de modelo. Primero, la idea de que los modelos son sistemas. Este no es un punto que sea destacado con frecuencia por los proponentes del RBM, pero es crucial para comprender el carácter específico que tienen los modelos como representaciones que simulan la realidad. Un modelo se puede definir como una representación sistémica de la realidad. El modelo es un paralelo a esta última puesto que no se limita a copiar los elementos que componen una situación, sino que evidencia la estructura en que los componentes se relacionan e interactúan entre sí, exhibiendo sus relaciones causales e interconexiones. En otras palabras, un modelo representa la estructura de un sistema y la manera cómo al interior de éste se comportan sus constituyentes. Por ejemplo, un investigador que estudie el comportamiento de ratones que han sido expuestos a una sustancia que genere aversión hacia ciertos alimentos, para dar cuenta de los resultados de investigación puede recurrir a explicaciones con diagramas de flujo que incorporen una representación de las variables de conducta bajo la influencia o no de la droga (Aclaro que este no es un ejemplo de un modelo mental en un sentido estricto, ya que es una representación externa a la mente. El problema sobre la definición de modelo como una representación *mental* se abordará más adelante). Esto significa que un modelo es un vehículo representacional que contiene la forma cómo se estructura y comportan los elementos de un sistema determinado. Es la configuración estructural sistémica que mantiene una consonancia con la realidad, aquello que lo define y diferencia de otros modos de representación.

La elaboración de modelos es una estrategia de pensamiento creativo tanto para el que razona en situaciones cotidianas, como en las sofisticadas investigaciones en el marco del saber científico. Un punto central en la fertilidad que tienen los modelos para el conocimiento es la posibilidad de hacer transferencias de información desde lo que se concluye a partir de la información instanciada en el modelo hacia la realidad que éstos representan. La transferencia de información desde un dominio a otro hace que el proceso de elaboración de modelos se vincule estrechamente con la producción de analogías (Nersessian, 1999, 2002, 2008). No todo proceso de RBM involucraría la utilización de analogías en principio, pero como se verá más adelante, constituye una de sus manifestaciones más sobresalientes.

Una analogía en términos generales es definida como una relación de semejanza entre dos entidades o sistemas, a los que denominamos *dominios*. Como proceso cognitivo, la producción y utilización de analogías sustenta inferencias a partir de las concordancias entre un dominio y otro (lo que antes se definió como isomorfismo). De este modo se realizan transferencias de información que resultan productivas para un razonador. Recordemos la clásica analogía que Platón usaba para entender el conocimiento, expuesta en la célebre “Alegoría de la Caverna”. En ésta Platón representa los grados de conocimiento a través de los grados de claridad en la percepción dentro y fuera de la caverna. Siguiendo la analogía, acceder al conocimiento de la verdad es como haber salido de las tinieblas de una caverna. La analogía funciona porque precisamente permite establecer un conjunto de inferencias sobre las diversas formas de conocer y los grados de verdad en el conocimiento a partir de la relación de semejanza establecida entre los dos dominios que constituyen la analogía. Esta analogía entre el conocimiento y el ver claramente expresa el modelo teórico acerca de la verdad que Platón defiende. Tomando

otro ejemplo, en el mismo caso de las ciencias cognitivas, la metáfora computacional² ha sido el eje de muchas teorías sobre cómo opera la mente humana. Johnson-Laird es partidario de su viabilidad, sobre todo porque a través de la implementación de programas computacionales ha sido posible estudiar cómo operan ciertos procesos cognitivos. Es decir, se utiliza un modelo acerca del funcionamiento de la mente aplicado a la analogía con un computador para comprender como opera la mente. Las conclusiones que se extraen en el dominio representacional del modelo se transfieren hacia la comprensión del fenómeno real. Si bien ambas analogías, la de la mente entendida como un computador y la de la caverna de Platón sobre el conocimiento, son profundamente distintas en lo que concierne a su contenido, propósito y complejidad, sirven como casos para ilustrar cómo es posible razonar construyendo representaciones modélicas analógicas que permiten transferir inferencias desde un plano de experiencia hacia otro.

La creatividad en la generación de un modelo y su consecuente aplicación exitosa para comprender la realidad o predecirla, se relaciona en ciertos casos con la fertilidad de las analogías sobre las cuales se construye (para examinar un ejemplo en más detalle, véase el análisis que hace Nersessian sobre las investigaciones de Maxwell, en Nersessian 2008, y la sección 2.2. de este trabajo). Un modelo puede construirse en base a una analogía. A través de la inclusión de analogías en la elaboración de un modelo es posible descubrir perspectivas novedosas para abordar un problema que, según Nersessian, conducen al cambio conceptual. Dedicaré más adelante una sección sobre la forma como operan las analogías en el RBM.

Los modelos pueden adoptar diversos formatos. Los formatos varían según la fuente de información en la que se origina el modelo – por ejemplo, desde la percepción, desde la imaginación, desde una abstracción - o simplemente por adoptar distintas formas de representación según aquellas que le parecen más pertinentes o cómodas al razonador. Un criterio para clasificar los modelos consiste en diferenciarlos entre *modales* y *amodales* (Johnson-Laird, 1983). Esto hace notar que los modelos no necesariamente guardan una correspondencia de semejanza directa entre el carácter de los elementos que los componen con la situación que representan. Esto significa que un modelo puede mantener un formato representacional semejante o fiel a las características de las fuentes de información en las que se generó o bien puede adoptar un formato distinto. En el primer caso el modelo es *modal*, en el segundo *amodal*. Un ejemplo de representación *modal* consiste en hacer un esquema visual, como en el caso de los dibujos de los esqueletos humanos presentados anteriormente. Los modelos basados en la percepción que conservan la misma información perceptual como material base para la elaboración de la representación son *modales*. En cambio, la elección de un formato distinto de representación al de la fuente original de la información da origen a modelos *amodales*. Estos utilizan un vehículo representacional, que comparado con la fuente de información, tiene propiedades distintas e incluso arbitrarias. Tal caso ocurriría cuando a partir de un discurso escrito se elaboran representaciones icónográficas.

Johnson-Laird (1983, 1989, 1990, 2001, 2004, 2005) sostiene que los modelos mentales permiten realizar inferencias, predecir y entender fenómenos. En el plano de la toma de decisiones, posibilitan la elección de acciones a seguir y el control de su ejecución.

² Sobre la diferencia entre la metáfora y la analogía, respecto a su rol en la cognición es interesante destacar que no existe una demarcación muy estricta entre éstas. Hay quienes respecto de este punto sostienen que es mejor referirse a analogías cuando se habla de cognición y metáfora cuando se apela a una creación poética, pero también hay casos en que se consideran las metáforas como el punto de partida que después sirve para desarrollar un proceso de razonamiento analógico. En la sección 1.4.2. se presentan algunas ideas sobre este punto.

Los modelos mentales son representaciones que sustentan procesos de razonamiento. En algunos casos se basan y asemejan bastante a nuestras percepciones sensoriales, pero también son expresados recurriendo al uso de términos abstractos. Sobre este punto, es frecuente encontrar en las diversas publicaciones de este autor, variados ejemplos de la utilización de modelos mentales donde se representa una inferencia silogística expresada en forma de lenguaje ordinario (Johnson-Laird 1983, 1989, 2005) utilizando tokens que cumplen una función simbólica *amodal*, tal como lo definimos anteriormente. Por ejemplo dado el problema: “María es más baja que Luisa pero más alta que Carmen, Carmen es más baja que Silvia y Silvia mide lo mismo que Luisa ¿Quién es la más baja de todas?” Una forma de representación modélica de este problema sería:

Luisa Silvia

María

Carmen

En este caso la distribución espacial de arriba abajo representa los conceptos de “alto” o “bajo”, la conclusión se extrae fácilmente.

Otra forma de representar el problema es:

Carmen < María < Luisa

< Silvia

En esta segunda alternativa la posición en este caso de izquierda a derecha sirve para representar con apoyo de los símbolos las relaciones de “más bajo que” o “más alto que”.

“La realización de una inferencia lógica como el modus ponens se produce mediante la manipulación de símbolos amodales dispuestos espacialmente de tal modo que se capturan las dimensiones estructurales sobresalientes del problema y luego la búsqueda de contraejemplos para la transformación del modelo” (Nersessian, 2008, p. 99).

El lenguaje es una fuente que permite elaborar representaciones modélicas que no se fundamentan necesariamente en los datos sensoriales, pero que sí permiten conectar el contenido de dichas construcciones con el mundo percibido. Con esto quiero decir que la elaboración de un modelo basado en la interpretación de un discurso puede tomar como punto de partida las experiencias del razonador. Este recurso es utilizado frecuentemente en educación. Por ejemplo, cuando un estudiante de enseñanza media recibe una explicación de forma oral sobre la composición del átomo acompañada de representaciones diagramáticas sobre la estructura del átomo (las del libro de texto, por ejemplo). A través de este proceso, la interpretación del discurso y el resto de información recibida posibilitan que el estudiante elabore una representación mental, un modelo, sobre el fenómeno en cuestión, el átomo. Esto a su vez es complementado por las imágenes y asociaciones que pueda evocar el estudiante con sus conocimientos previos y experiencias sensoriales compatibles con la información recibida. Un ejemplo notable de un proceso semejante se expone en la *figura 2*. En esta se evidencian los cambios que sufre la

representación que tienen los niños sobre la forma de la Tierra a medida que adquieren nuevos conocimientos en la escuela. En las secciones intermedias se puede apreciar cómo hay momentos en que surge un conflicto entre las representaciones sensoriales directas e ingenuas (Tierra plana) con la idea de la Tierra redonda.

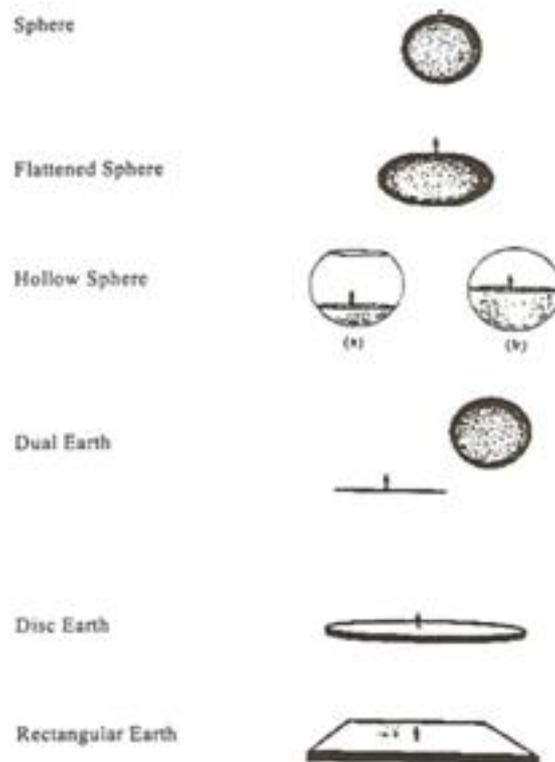


Fig. 2. Modelos de la Tierra

(Franco, 2000 . Imagen citada desde: Voniadou, "Universal and culture-specific properties of children's mental models of the Earth, 1994)

1.3. Sustrato Cognitivo de los Modelos Mentales y el RBM.

1.3.1. Procesos Cognitivos Asociados al RBM.

La teoría de los *modelos mentales* emergió del intento de Johnson-Laird de explicar el proceso que conduce a efectuar inferencias tanto implícitas como explícitas (Johnson-Laird, 1983). Se entiende como implícitas aquellas inferencias que no tienen un procesamiento consciente o que constan de ciertos ingredientes que se escapan de la manipulación de información que aparece como evidente. En nuestra vida diaria hay procesos de inferencia ocurriendo a cada momento, aún cuando no exista clara conciencia de eso. El cálculo que hacemos de la velocidad con la que debemos cruzar a pie una calle que no tiene semáforo, es un ejemplo de inferencia implícita.

El comportamiento humano se entiende como una consecuencia de una constante cadena de razonamientos que no alcanza plenamente el nivel de la conciencia y que, según Johnson-Laird, no puede ser explicada por la existencia de una lógica mental. En esta línea el RBM no es solo una habilidad exclusiva de razonadores expertos que se dedican a la actividad científica. La capacidad de crear y manipular modelos es parte del razonar humano común. Es una habilidad que en menor o mayor medida todos poseemos y que es posible desarrollar a través del aprendizaje, desde una práctica novicia hasta conseguir una experticia que se manifiesta en la elaboración de modelos más ricos, de una naturaleza más compleja. El tipo de modelos que cada individuo genere y utilice depende en gran medida del entorno en el que está embebido y los conocimientos con los que cuenta. Estos factores aportan una gran fuente de constreñimientos y posibilidades efectivas (affordances) en la estructuración y manipulación de modelos. El modelado mental es aplicado por humanos en la variedad de problemas a los que se enfrentan a lo largo de la experiencia cotidiana, siendo la construcción de representaciones científicas una extensión sofisticada de nuestra capacidad, de, por ejemplo, programar rutas para llegar a un destino, hacer cambios en la decoración, inferir qué actividades nos conducirán mejor a nuestros objetivos, etc.

La innovación al interior de la actividad científica, cuyo resultado es el cambio conceptual, se origina al extender los procesos de razonamiento a un ámbito más complejo de resolución de problemas. Esto implica además admitir que el RBM no solo está ligado a prácticas sofisticadas que resultan en la producción de conocimiento científico, sino que, además, a otras actividades humanas sustentadas en el razonamiento creativo, como por el ejemplo, el desarrollo de la tecnología y el diseño (Gilbert, J. K., Boutler, C. J. Eds., 2000). A modo de introducción al análisis que efectuaré en esta sección presento un caso extraído de una experiencia real de un estudiante de diseño industrial.

El diseño industrial tiene como propósito central la creación o mejora de objetos funcionales. Por ejemplo un diseñador de automóviles, teniendo en cuenta las necesidades del mercado o de los consumidores, crea modelos de automóviles que incorporan modificaciones a los ya existentes. Estas últimas son percibidas como una mejora para el consumidor objetivo, incorporando nuevas tecnologías o nuevos materiales. A un joven estudiante de segundo año de la carrera de diseño industrial se le encarga la tarea incorporar mejoras a un objeto de uso común, un cuchillo (Fig. 3). Su tarea consiste en crear una línea de cuchillos que incorpore una modificación que repercuta en la percepción y manipulación del objeto haciéndolo más cómodo y efectivo, en relación a la función que tiene para el usuario, el corte. El proceso creativo comienza con la observación detallada del cuchillo durante su utilización en diversas tareas de corte y la indagación de diversas opiniones de usuarios. Luego de observar y analizar una variedad de situaciones donde se utiliza el cuchillo, el diseñador recrea mentalmente una situación tipo donde se reproduce la acción de cortar. Realiza bocetos y anotaciones sobre las modificaciones que debe incorporar. La manipulación de esas representaciones en conjunto con el recuerdo de las situaciones observadas, le permite constatar la existencia de un factor no incluido en el modelo mental: la importancia que tiene en ciertas tareas de corte el apoyar el dedo índice sobre la parte superior de la hoja del cuchillo con el fin de dar estabilidad, firmeza y precisión al corte. El diseñador ya ha descubierto el problema a solucionar: modificar la forma del cuchillo para mejorar la manipulación de éste en tareas de corte donde se utiliza el apoyo del dedo índice. Para esto comienza la elaboración de los prototipos y maquetas que apoyarán la ejecución de su cometido a la perfección. La presencia de modelos mentales subyace a cada instante: cuando el diseñador registra situaciones reales de corte, cuando incorpora modificaciones paulatinas a sus prototipos de diseño, al crear una maqueta - reproducción

física del objeto diseñado mentalmente - cuya manipulación permite a su vez incorporar nuevas modificaciones al diseño.

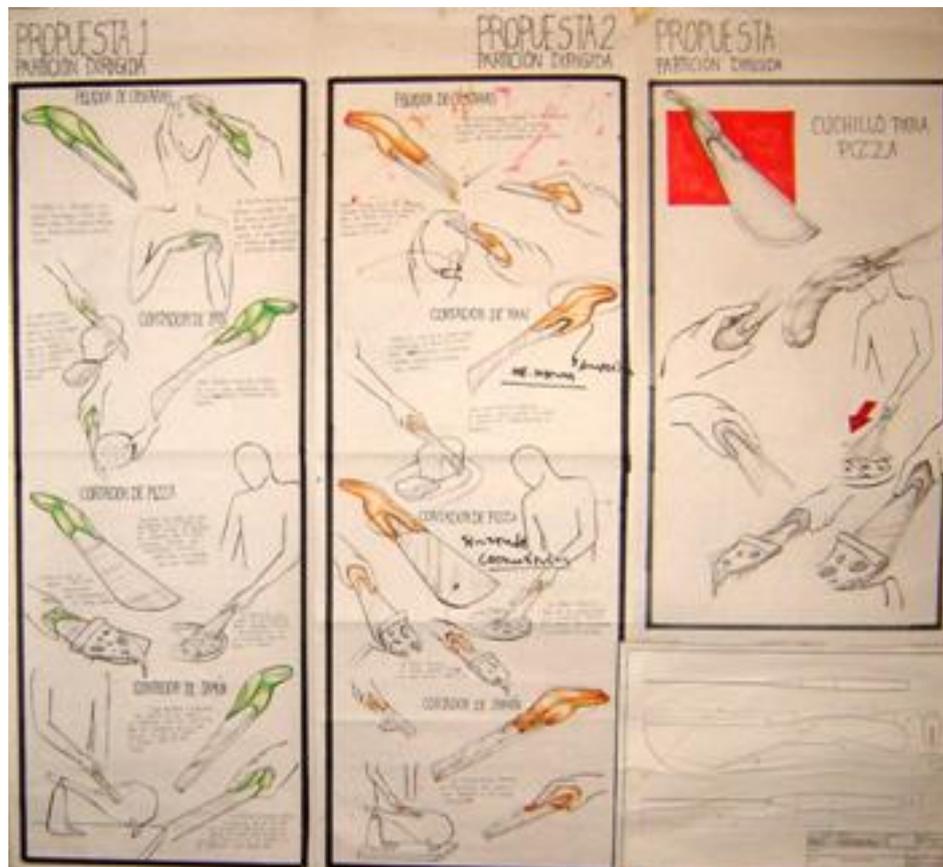


Fig. 3. Láminas confeccionadas en el proceso de diseño de un cuchillo.

La situación descrita contiene varios elementos relevantes para hacer una caracterización de los procesos cognitivos que sustentan el RMB. En este caso es la *simulación* la principal *práctica generativa* en juego. Se utilizan diversas *modalidades de representación*, mentales y materiales, imágenes, bocetos, maquetas, *basadas en la percepción* que sirven de apoyo al proceso de simulación llevado a cabo por la mente. Además existe una importante confluencia de información desde el *exterior* hacia la *mente* del individuo y viceversa, en un proceso de constante retroalimentación y *acople*. La información que se procesa en este sistema acoplado es utilizada por el razonador en tiempo real, es decir en registros procesados en la *memoria de trabajo*. Algunos de estos puntos se encuentran sintetizados en la siguiente cita de Nersessian:

“Hay cuatro puntos que destacar desde el uso mundano a los que recurriremos durante todo el resto de este capítulo y que conllevan a la consideración del uso científico: (1) Los humanos parecen capaces de crear representaciones desde la memoria que les permiten imaginar que están en situaciones solo a través de la simulación mental; (2) el proceso de imaginación puede tomar ventaja de las posibilidades efectivas en el ambiente para hacer la solución de problemas más fácil; (3) las predicciones, y otros tipos de soluciones alcanzadas a través de este tipo de simulación mental, son a menudo correctas -o lo suficientemente buenas- en casos mundanos; y (4) cuando la solución falla, un amplio rango de

herramientas culturalmente disponibles pueden ser usadas, tal como sacar una cinta de medir o hacer un cálculo” (Nersessian, 2008, p. 106)

Nersessian destaca ciertas habilidades básicas que comparten el uso común y el experto en los procesos de RBM: la capacidad para crear representaciones, el uso de la imaginación, simulación mental y la posibilidad de hacer inferencias predictivas sobre esta base, destacando además el apoyo de artefactos externos, que denomina “herramientas culturales”. Este término es preciso en destacar que las prácticas de razonamiento desde la perspectiva de Nersessian se encuentran embebidas en un entorno cultural determinado. En esta sección me propongo analizar estos temas además de los mencionados anteriormente a propósito del ejemplo del diseño industrial.

Un problema central para una psicología cognitiva sobre el RBM es dar cuenta de los procesos conducentes a la creación y posterior operación mental con modelos. Este es un tema complejo que involucra una revisión detallada de los diversos procesos cognitivos imbricados en las tareas de modelado. Esto supera ampliamente el propósito y alcance de este trabajo. No obstante, es una tarea que no se puede eludir del todo, dado que desde una tal revisión se hacen patentes los supuestos cognitivos sobre los que se sostiene la propuesta central de esta tesis. En su obra *El ordenador y la mente*, Johnson-Laird (1990) entrega un panorama amplio sobre cuales son las teorías acerca de la percepción, el lenguaje, la representación, la memoria, el aprendizaje e incluso el movimiento, que constituyen la base cognitiva más amplia en la que se sostiene su propuesta sobre modelos mentales. Pero, teniendo en cuenta que el RBM es un tipo de razonamiento que opera en contextos reales en la resolución de problemas, como lo plantea Nersessian en su enfoque histórico- cognitivo, la revisión que hace Johnson-Laird requiere ser complementada con la consideración de elementos que aproximan esta concepción a los planteamientos de teorías alternativas en ciencia cognitiva, como las de la cognición corporizada y cognición extendida. En lo que sigue, daré cuenta de esta variedad de puntos de vista de una forma acotada, principalmente con el propósito de situar al lector en el contexto general de las ciencias cognitivas.

Primeramente, las investigaciones que se llevan a cabo sobre modelos mentales se pueden dividir entre aquellas que conciben los modelos como estructuras almacenadas en la memoria de largo plazo o como estructuras temporales que se construyen en función de los requerimientos en la solución de problemas, es decir, procesadas en la memoria de trabajo. Johnson-Laird y Nersessian, los autores que he escogido como los principales referentes teóricos para esta investigación, se sitúan en el grupo que investiga los modelos mentales como estructuras de pensamiento almacenadas en la memoria de trabajo (Johnson-Laird, 1983; Nersessian 2008).

El concepto de memoria de trabajo fue introducido por Badeley en 1976, para dar cuenta del proceso de almacenaje temporal de información requerida para la realización de tareas o solución de problemas en tiempo real. Entender los modelos mentales como un constructo alojado en la memoria de trabajo, se condice con la idea de que éstos no constituyen entidades fijas, preexistentes en alguna locación en la mente, y que su elaboración y utilización responde a las tareas realizadas en tiempo presente. Esto no descarta por completo el rol que pudiesen tener los registros de la memoria de largo plazo, de hecho son importantísimos dado que aportan con los conocimientos contextuales previos del razonador. Además, que los modelos mentales sean constructos temporales de la mente, no implica que no se almacenen a largo plazo, para su posterior utilización. El punto central es que los modelos son entidades que se definen por su rol en la ejecución presente

del razonamiento humano. La capacidad del pensamiento humano de operar sobre la base de modelos, requiere de la utilización de recursos de procesamiento online.

La conclusión del párrafo anterior es de bastante relevancia para el ámbito educativo: los recursos cognitivos para construir un modelo y utilizarlo se combinan con aquellos necesarios para comprender un modelo creado por otro (como los modelos científicos) y almacenarlo en su memoria de largo plazo. Esto involucra estrategias cognitivas para la comprensión y asimilación, pero además, estrategias que están destinadas a la transformación y creación de representaciones modélicas. Las propuestas que vinculan el RBM con el aprendizaje de las ciencias buscan hacer confluir ambos puntos.

Los modelos son una clase especial de representación que permite la operación con información en escenarios complejos, que requieren del análisis de mucha información y de diversa índole, en entornos determinados socio-culturalmente. Para Johnson-Laird la existencia de la representación como mecanismo para conocer el mundo es una consecuencia de la evolución (Johnson-Laird, 1990). Su hipótesis es que la evolución de los seres biológicos no podría avanzar más allá de cierto punto sin la existencia de la capacidad para representar. Es decir, la capacidad de transducir información del entorno para ser procesada por el aparataje mental en ciertas especies sería algo necesario. El comportamiento de las bacterias, por ejemplo, depende puramente de su habilidad para detectar químicos en el ambiente. Es decir, a un nivel básico el comportamiento de los organismos vivos simples no reside en que posean o no representaciones. Una bacteria no tiene actividad mental, su comportamiento no depende de una interpretación interna del mundo (lo que también podría implicar que no necesitamos postular la existencia de estados mentales para comprender su comportamiento). Pero en el caso de especies que se desenvuelven en un ambiente más complejo, especialmente los mamíferos, la existencia de la representación es necesaria, para proyectar escenarios futuros, planificar acciones cuando los estímulos no se encuentran directamente presentes, como en el caso de la especie humana.

Las representaciones constituyen una forma de experimentar el mundo indirectamente. Este proceso está mediado por la transducción que realizan los órganos de los sentidos. Así, la mente y el sistema perceptual tienen una injerencia decisiva en el mundo que finalmente percibimos.

“Con la evolución del sistema nervioso, el organismo ha desarrollado transductores sensoriales sensibles a los estímulos de objetos distantes. Estos transductores convierten la energía de los estímulos en impulsos nerviosos, y estos impulsos son sucesivamente el input de un proceso computacional que conduce a la construcción de representaciones del mundo” (Johnson-Laird, 1983, p. 402).

La pregunta acerca de cómo asegurar si las representaciones efectivamente coinciden con el mundo no viene a lugar, dado que la visión que se tiene del mundo es causalmente dependiente tanto de la forma en que el mundo se presenta a quien lo conoce como de las características propias del agente cognitivo. En otras palabras, en una representación se combina el producto de la actividad mental con aquella información que es recibida del entorno. La noción de representación que da forma, en principio, a la visión de Johnson-Laird y de Nersessian es compatible con la hipótesis de los símbolos físicos. Es decir, la idea que los símbolos que constituyen las representaciones no son entidades que se conjugan de manera puramente sintáctica, sino que éstos adquieren un contenido relativo

a estímulos sensoriales. Es decir que existe una conexión entre el símbolo y ambiente. Un input sensorial produce estructuras de símbolos que desencadenan acciones motoras.

“Los supuestos fundamentales fueron reiterados y elaborados nuevamente por Alonso Vera y Herbert Simon en respuesta a las críticas. Ellos especifican un “sistema de símbolos físicos” como poseedor de una memoria capaz de almacenar símbolos y estructuras de símbolos y un conjunto de procesos de información que forman los símbolos y estructuras en función de los estímulos, los que en el caso de los humanos son estímulos sensoriales. Los estímulos sensoriales producen estructuras de símbolos que causan acciones motoras, las cuales por su parte modifican las estructuras de símbolos en la memoria. Tal sistema de símbolos físicos interactúa con el ambiente a través de la recepción de información sensorial desde este y convirtiendo esto en estructuras de símbolos en la memoria y actuando sobre ellas en maneras determinadas por aquellas estructuras de símbolos. Los procesos perceptuales y motores conectan estructuras de símbolos con el ambiente, proveyendo así de una semántica para los símbolos. En el caso de los humanos, entonces, toda representación y procesamiento ocurre al interior del cerebro-mente humano.” (Nersessian, 2008, p. 96)

Desde un punto de vista clásico en ciencia cognitiva – que concibe la mente como una unidad procesadora de información que opera activada por inputs externos y que decanta su actividad en outputs que constituyen acciones fuera del ámbito de lo mental –, las representaciones se configuran sobre la base de símbolos que se procesan al interior de la mente, en la memoria. Estos símbolos, siguiendo la hipótesis de los símbolos físicos de Herbert Simon (Newel & Simon, 1976) adquieren un significado conforme a los inputs sensoriales. De acuerdo a esto, los modelos son representaciones que primariamente deben su fundamento a la existencia de símbolos con contenido derivado de la experiencia en el mundo.

Los modelos mentales deben su origen al refinamiento que en el sistema nervioso ha desarrollado la capacidad de percibir de los organismos vivos, creando estructuras representacionales cada vez más complejas. Pero los modelos mentales pueden servir a otros propósitos más allá de formar una representación del mundo percibido. Pueden ser usados para interpretar el lenguaje y hacer inferencias, constituyendo esto una extensión natural de su función básica anclada en la representación de estados derivados de la percepción.

La construcción de un modelo mental, según la exposición de Johnson-Laird (1983) se ajustaría a cuatro constreñimientos relativos al procesamiento que realiza la mente al construir y operar con los modelos. El primero de estos constreñimientos es el de *computabilidad*. Según las mismas palabras de Johnson-Laird este principio está estrechamente vinculado con la doctrina del funcionalismo en ciencia cognitiva, la que, en términos bastante someros sostiene que la mente puede ser estudiada independientemente del cerebro, es decir, si bien existe un sustrato neurofisiológico para los procesos mentales, la naturaleza física no constriñe los patrones de pensamiento. Siguiendo la línea de este pensamiento, la *computabilidad* permite que los modelos mentales se constituyan como entidades no neurofisiológicas, sino simbólicas, aunque puedan tener un correlato de tal índole.

El segundo constreñimiento es el de *finitud*. Este surge de la capacidad limitada de nuestro cerebro, especialmente de la memoria de trabajo. Significa que un modelo mental debe ser finito y no puede representar directamente un dominio infinito de estados de cosas. En otras palabras, está referido a las limitaciones respecto a la cantidad de información que puede contener un modelo según la capacidad de procesamiento que tenga el razonador.

El tercer constreñimiento es el de *constructivismo*. Se refiere a que un modelo mental es esencialmente una construcción conformada a partir de tokens que están dispuestos en una particular estructura que permite representar un determinado estado de cosas. Estos tokens, pueden ser constituyentes arbitrarios en relación al estado de cosas que representan, como en las representaciones lingüísticas y en general en toda representación de carácter amodal, o también estar fundados en características abstraídas desde la percepción (Johnson-Laird, 1983). No es el sustrato de los símbolos - si son modales o amodales - lo que define que una representación tenga el carácter de modélica, sino el hecho de que es un constructo elaborado con el propósito de representar un determinado estado de cosas.

Por último se encuentra el constreñimiento sobre la *economía* de los modelos, la economía sobre qué es representado en un modelo mental. Esto se encuentra delimitado principalmente por la información que se evidencia como verdadera a partir de la interpretación de un problema. La economía constriñe al modelo hacia aquello que es considerado como posible. El principio de economía determina además que al construir una representación modélica ésta debe mantenerse dentro de un límite de información que sea adecuado para el procesamiento mental. Si un problema contiene elementos indeterminados para el razonador, éstos solo pueden ser representados si no existe un crecimiento exponencial de información que se vuelva intratable para el procesamiento. La economía de las representaciones modélicas implica, además, que cada elemento que compone un modelo mental y también las relaciones estructurales que en este se manifiestan deben tener un rol simbólico, es decir, un modelo para operar eficazmente debe carecer de elementos vacuos o faltos de significado.

1.3.2. Tipos de modelos como representaciones organizadas de información

Johnson-Laird establece una diferencia entre *modelos mentales físicos* y *modelos mentales conceptuales* (Johnson-Laird, 1983). Los modelos físicos representan el mundo físico teniendo como base la experiencia sensorial directa con el mundo, en cambio los segundos representan fenómenos abstractos. Dentro del grupo de modelos físicos están los *modelos relacionales, espaciales, temporales, cinemáticos, dinámicos e imágenes*. Los *relacionales* corresponden a una representación estática que posee un conjunto finito de tokens que hacen referencia a un conjunto a su vez finito de entidades físicas, de propiedades y relaciones. Los *espaciales*, son un tipo de modelo relacional pero que representa relaciones exclusivamente espaciales. Los *temporales* son modelos que se componen de secuencias espaciales que ocurren en un orden temporal, pero que no necesariamente corresponden a secuencias en tiempo real. Los *cinemáticos* son modelos temporales, pero físicamente continuos y que pueden correr en tiempo real emulando directamente el contenido de la percepción. Los *dinámicos* son un tipo de modelo cinemático, pero que incluye además representaciones de las relaciones causales de los eventos descritos. Las *imágenes*, que corresponden al bosquejo en 2 ½ dimensiones postulado por Marr en su teoría del proceso de la visión, son representaciones centradas en exponer las características visibles de un

modelo tridimensional espacial o cinemático. Dentro del grupo de modelos físicos, Johnson-Laird declara que quizá es la causalidad la única propiedad que no emerge directamente del mundo físico, pero aún así es una representación anclada en la experiencia sensorial. Por lo tanto un modelo físico que exhiba relaciones causales, aun cuando éstas no sean directamente perceptibles, es igualmente un modelo físico por el tipo de fenómeno al que se refiere.

Los *modelos conceptuales* requieren de la existencia de una maquinaria mental capaz de representar conectivas, relaciones condicionales y cuantificadores. El conjunto de modelos conceptuales incluye los modelos *monádicos*, *relacionales*, *meta-lingüísticos* y *teóricos*. Los modelos *monádicos* representan aserciones sobre individuos, sus propiedades e identidades entre sí. Los modelos *relacionales* representan relaciones abstractas; los *meta-lingüísticos* contienen tokens que corresponden a expresiones lingüísticas y las relaciones abstractas que se puedan establecer entre éstas. Los modelos *teóricos* (set-theoretic) representan a través de tokens un conjunto finito abstracto con sus propiedades y relaciones también abstractas.

Las figuras presentadas a continuación son ejemplos de diagramas que exponen tipos diversos de representaciones modélicas, según la categorización recién expuesta. Los ejemplos han sido adaptados de algunos de los expuestos por Ronald Giere (1999). La Fig. 4 muestra un mapa del sector céntrico de la ciudad de Santiago. Esta representación de la ciudad refleja un tipo de modelo físico, relacional y espacial, pues está basado en información percibida y se concentra en la exposición de la distribución espacial de las calles y cómo están interconectadas. Es un modelo de imagen porque se funda en el parecido visual entre la representación y la visión aérea de la ciudad.



Fig. 4. Mapa de Santiago.

<http://www.bicimapas.com.mx/MapasGPS/Internacionales/Santiago2.jpg> [Consulta: 10/10/2010]

La Fig. 5 exhibe un plano del recorrido del Metro de la ciudad de Santiago. El modelo que se expresa a través de esta representación visual es físico, relacional y espacial, igual que en el caso anterior. Es un modelo imaginístico, pero su contenido es notablemente más abstracto que en el caso anterior. Además, incluye información sobre las rutas de interconexión entre estaciones y líneas. Por lo tanto puede clasificarse como un modelo dinámico, ya que presenta relaciones causales, aunque de manera bastante simple, sobre la forma como opera el recorrido.



Fig. 5. Plano de red Metro de Santiago

<http://www.metrosantiago.cl/estacion/plano-red> [Consulta: 10/10/2010]

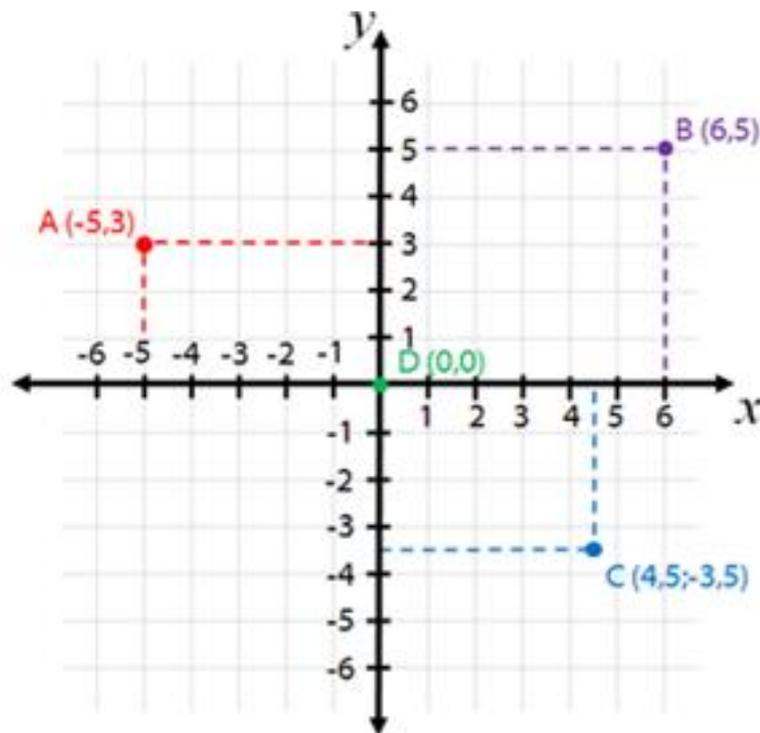


Fig. 6. Plano Cartesiano

<http://epamatemáticas.blogspot.com/2010/06/el-plano-cartesiano.html> [Consulta: 10/10/2010]

[Consulta: 10/10/2010]

[La Fig. 6. es un ejemplo de modelo conceptual. La representación de una función en el plano cartesiano exhibe propiedades relacionales entre entidades abstractas. Es por tanto un diagrama que exhibe un modelo conceptual, relacional y teórico.](#)

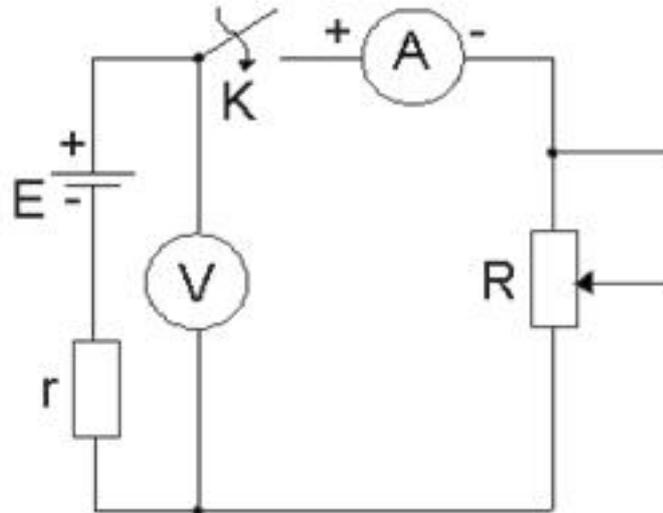


Fig. 7. Circuito Eléctrico

<http://www.uib.es/depart/gte/edutec-e/revelec16/leon.htm> [Consulta: 10/10/2010]

La Fig. 7 es una representación diagramática de un modelo que combina aspectos físicos y conceptuales. Es un modelo relacional ya que evidencia nexos entre los diversos componentes que conforman un circuito eléctrico. Es dinámico porque evidencia las posibles interacciones causales de la corriente eléctrica a lo largo del circuito con elementos de resistencia y medición de amperaje y voltaje. Pero además es teórico porque incluye elementos teóricos explicativos sobre cómo opera la corriente eléctrica.

1.3.3. Los modelos y el problema sobre la mente individualizada, extendida, distribuida y corporizada.

Existe un asunto de singular importancia que quizá un lector agudo o familiarizado con estas temáticas ya haya vislumbrado como problemático. Johnson-Laird habla de *modelos mentales*, pero en la exposición he citado como ejemplos algunas representaciones que no necesariamente se presentan *en* la mente, entendiendo este último concepto desde un punto de vista tradicional, como la mente individualizada, esto es, independiente del mundo externo. Por ejemplo, los diagramas presentados en la sección anterior, las representaciones hechas por medio de programas computacionales o las representaciones escritas que se utilizan comúnmente para resolver problemas matemáticos (el caso más evidente es el de la geometría). Efectivamente, éstas son consideradas parte de las prácticas de modelado, pero no son en ese sentido restringido, *mentales*. Es un tema de interés para las ciencias cognitivas el determinar si ese tipo de representaciones son catalogables como mentales o no. Una pregunta que surge frente a esto es la siguiente: ¿utiliza el RBM *modelos exclusivamente mentales*?

Si se entiende que lo mental solo corresponde al procesamiento interno de símbolos, es decir, como lo que ocurre entre el input externo y el output - tal como lo concibe la

ciencia cognitiva clásica - la propuesta sobre RBM no solo incluye modelos mentales, sino además la exteriorización de los mismos. Pero el caso es que, si bien Johnson-Laird acoge los supuestos computacionalistas, que lo aproximan más a una visión clásica de la mente, incorpora también ciertas nociones que lo aproximan a aquellas propias de la cognición situada y corporizada: específicamente, respecto al modo en que la percepción modula el razonamiento y también el rol que tienen las representaciones externas en la construcción de un razonamiento.

Aunque Johnson-Laird aboga por una concepción computacionalista de la mente, no propugna un individualismo estricto, es decir, desde su óptica la mente no puede ser estudiada de forma independiente a las pautas contextuales en las que se inscribe el razonar humano. Esto ya implica ampliar el espectro de lo que se entenderá por procesamiento mental. Entonces para Johnson-Laird los modelos son mentales, pero no se constituirían únicamente al interior de la “caja craneana”. Nersessian (2008) y Giere (2002) enriquecen este punto de vista, integrando explícitamente ideas sobre la cognición distribuida, situada y corporizada. Conforme a estas perspectivas la noción de “mente” es mucho más flexible, en tanto que los límites de lo que se considera “mental” no están rígidamente delimitados. En este contexto es más propio hablar de un sistema cognitivo, donde la cognición se dispersa entre el individuo que dirige la tarea de razonamiento, los materiales, instrumentos de investigación y los otros investigadores. Es decir, si consideramos que la cognición trasciende las barreras craneanas, los modelos serían mentales, pero en un sentido bastante distinto al que se suele entender desde una óptica clásica. Nersessian de hecho utiliza el término modelo y modelado mental, pero se centra más en la noción de modelo, que en el hecho que sean mentales o no.

De acuerdo a lo anterior, Los modelos pueden ser entendidos como constructos elaborados por la mente, pero estos pueden plasmarse en el exterior, ser compartidos entre varios razonadores, y no registrarse necesariamente en la mente, entendida desde un punto de vista estrictamente tradicional. Esto se hace particularmente claro en aquellos casos donde las tareas de resolución de problemas se ven determinadas por la utilización de representaciones externas. Es interesante hacer notar este conflicto entre la noción tradicional de mente y aquella propuesta por los enfoques alternativos en ciencia cognitiva. Nersessian propone una metodología histórico-cognitiva para estudiar el razonamiento, que implícitamente acoge algunos de los supuestos de los enfoques alternativos.

“Desde esta óptica, las inferencias son hechas por el sistema cognitivo, el cual se compone de personas y una gama de artefactos. En el caso de la ciencia, la evidencia a partir de registros históricos y protocolos, y observaciones etnográficas de la “ciencia en acción” establece que muchos tipos de representaciones externas son usadas en el razonamiento basado en modelos: lingüísticas (descripciones, narrativas, comunicaciones orales y escritas), ecuaciones matemáticas, representaciones visuales, gestos, modelos físicos, y modelos conceptuales” (Nersessian, 2008, p. 116)

Esto implica considerar que los aspectos determinantes de la actividad científica, y específicamente el cambio conceptual, no se reducen a la actividad de la mente individual del científico, sino que es preciso considerar el contexto de la investigación, los constreñimientos heredados y presentes, la contribución de otros investigadores, el instrumental para la experimentación y de otro tipo y las representaciones externas. Sostengo en síntesis, que al hablar de modelos mentales se tiene en vista una noción bastante más flexible que la perspectiva individualista tradicional, en la que solamente factores mentales internos del individuo desempeñan un rol causal en la cognición.

Si bien Johnson-Laird pareciera no ser tan cercano a las versiones alternativas en su concepción sobre la mente, pienso que su postura no es incompatible con la de Nersessian. En esta tesis se adhiere a la idea de que los modelos mentales tienen su fuente de construcción principal en la mente entendida como “intracraneana” pero que no dependen exclusivamente de ésta ni se limitan a los elementos de su arquitectura interna para la generación, manipulación y evaluación de los modelos. Un punto interesante al respecto es la solución que propone Nersessian frente al conflicto entre individualismo y antiindividualismo: sostener que las representaciones internas y externas forman un sistema cognitivo *acoplado*.

Considero en este punto interesante destacar la teoría de la cognición distribuida propuesta por Hutchins, teoría que ha sido incorporada por Ronald Giere (otro de los principales proponentes del RBM) a su examen sobre la actividad científica (Giere, 2002). La cognición distribuida (Hutchins, 1995) es una visión alternativa en ciencias cognitivas que se centra en la idea de que la actividad cognitiva humana es parte integral de un sistema complejo y detallado. Hutchins sostiene que la manipulación de símbolos no implica que necesariamente este proceso deba ocurrir dentro de la cabeza de los sujetos. Como en el caso examinado por este autor de la navegación de un barco (Hutchins, 1995), donde la tarea se ejecuta a partir de las interacciones entre los sujetos, el ambiente y los instrumentos de navegación. Las operaciones se sustentan en una serie de manipulaciones de números y símbolos, pero se encuentran constituidas por los ambientes materiales, y de otra forma no serían posibles. El postulado central de la cognición distribuida sostiene que las tareas cognitivas se despliegan en entornos complejos donde es imposible concebir de forma aislada el rol de una mente individualizada de las interacciones de los individuos entre sí, el rol de los artefactos y el ambiente.

Un ejemplo sencillo de cognición distribuida es la resolución de problemas matemáticos. Cuando la cantidad de información que se utiliza para resolver un problema supera la capacidad de procesamiento en la memoria de trabajo del individuo lo más común es recurrir al uso de algún artefacto externo como una calculadora, un computador – como en aquellos casos donde se hace necesario representar la información en gráficos - o simplemente papel y lápiz. Tal como lo señala Giere (2002), hacer una demostración del teorema de Pitágoras pone en evidencia la conexión indisoluble entre los materiales externos y la mente del individuo en los procesos cognitivos. En este caso la cognición es distribuida porque el proceso de resolver el problema no solo se ejecuta en la mente del individuo, trasciende a lo que ocurre en su cabeza. La resolución de problemas matemáticos se efectúa interactuando visual y manualmente con el mundo material (como los diagramas, números y signos escritos en un pizarrón o representados con programas computacionales). En este caso la cognición es distribuida ya que la solución de problemas se ejecuta en la interacción entre los materiales utilizados e individuo. En otras palabras, la resolución de un problema se propaga a través de diversos agentes y/o artefactos, los que en su conjunto constituyen el sistema cognitivo distribuido.

Desde la perspectiva de la cognición distribuida, el estudio de la cognición humana no puede separar estructuras mentales, sociales y materiales. Este es precisamente uno de los pilares del enfoque histórico-cognitivo con el que Nersessian da cuenta de las prácticas científicas que operan con RBM. Aunque Nersessian no cita a Hutchins como referente para su enfoque sobre la cognición pareciera ser que ambos son concordantes en la valoración que se hace sobre el rol de las representaciones externas acopladas a las representaciones internas para la ejecución de tareas de resolución de problemas. Además esto conecta los postulados de Nersessian con la idea más general sobre la cognición situada, es decir, que

la cognición está determinada por los contextos sociales, culturales y físicos en los que ocurre.

Otro punto interesante de constatar es el posible nexo entre la teoría del RBM y la idea de que la cognición está fundada perceptualmente, tema principalmente desarrollado por el psicólogo cognitivo Lawrence Barsalou (Barsalou, 2008, 2010). Su propuesta en términos amplios sostiene que nuestra cognición opera sobre símbolos perceptualmente fundados, es decir que tienen un carácter principalmente modal, señalando que el foco del estudio de la cognición debe estar dirigido hacia simulación, acción situada y estados corporales. Esta acotación es relevante dado que la propuesta de Nersessian se vislumbra cercana a este tipo de explicación de la cognición y abre la posibilidad de investigar sobre las posibles conexiones entre las teorías de la cognición fundada (*grounded cognition*) y el RBM.

Los modelos mentales son un tipo de representación, que tiene como característica esencial constituirse como unidades organizadas que portan a través de esa misma organización un conocimiento sobre estructuras causales, espacio-temporales y relacionales. Este sería un postulado compartido entre quienes sostienen la existencia de los modelos mentales.

“Tal clase de modelado mental es una unidad organizada de conocimiento que encarna representaciones de relaciones espaciotemporales, representaciones de situaciones, entidades, y procesos, así también como representaciones de otras informaciones pertinentes, tal como la estructura causal... Un modelo mental es un sistema conceptual que representa el sistema físico sobre el cual se razona. Como tal, es una abstracción – idealizada y esquematizada en naturaleza- que representa una situación por medio de la tenencia de objetos sustitutos y las propiedades, relaciones, comportamientos o funciones que están en correspondencia con éstos” (Nersessian, 2008, p. 128)

Los modelos se definen como conceptuales en la medida que son estructuras simbólicas creadas por la mente y que portan un significado sobre el mundo. Pero la creación y manipulación de un modelo difícilmente puede ser entendida como una actividad solo determinada por la actividad de la mente. En lo señalado en los párrafos previos se destacó el rol de los artefactos y representaciones externas. También es importante constatar la importancia que tiene el cuerpo en la cognición, no sólo en el sentido antes señalado, sobre el fundamento perceptual de los conceptos, sino por el rol modulador que tiene el que la cognición ocurra en una mente *corporizada*. Como en el ejemplo del diseño del cuchillo presentado en la sección 1.3.1. donde las inferencias estaban directamente relacionadas con las representaciones hechas a partir de las interacciones físicas con el objeto, o como en el caso de las representaciones de la Tierra (Fig. 2) donde las primeras nociones están determinadas por la experiencia directa con el mundo (La tierra se representa como plana en un principio, porque desde nuestra experiencia física directa la percibimos de ese modo).

“Desde un punto de vista medioambiental, el medioambiente simplemente no “andamia” los procesos cognitivos como en las explicaciones tradicionales; sino más bien, los aspectos del medioambiente se sostienen como siendo integrales al sistema cognitivo y entrado así esencialmente al análisis de la cognición. Las explicaciones del procesamiento cognitivo humano en esta área a menudo emplean la noción de “sintonía de constreñimientos y posibilidades efectivas” [“attunement to constraints and affordances”] adaptada desde la teoría

de la percepción de J.J. Gibson (1979). En la adaptación situada (Greeno 1998), una “posibilidad efectiva” [affordance] es un recurso en el ambiente que sustenta una actividad, y un “constreñimiento” es una regularidad en un dominio que es dependiente de condiciones específicas” (Nersessian, 2008, p. 116)

La traducción de “affordance” puede entenderse aquí como una posibilidad efectiva dadas ciertas condiciones. Nersessian interpreta el concepto de “affordance” como una fuente de posibilidades que sostienen y constituyen una actividad cognitiva, aspecto que recoge el rol de “andamiaje” ejercido por el entorno sobre la cognición, pero que conlleva una modulación de la actividad conforme a las fuentes efectivas desde la situación contextual del razonador. Esto significa que situaciones distintas en combinación con un agente cognitivo particular resultan en “affordances” de diversa índole. Los constreñimientos a su vez aportan con una cierta normatividad propia de la situación en la que opera la actividad cognoscitiva del razonador y que delimitan las características esenciales a incorporar en la elaboración de representaciones modélicas.

“En síntesis, la facilidad para el modelado mental es una combinación de la biología del individuo y el aprendizaje, y se desarrolla en interacción con las realidades naturales, sociales y culturales, en la cuales se está embebido” (Nersessian, 2008, p. 108)

Nersessian considera que los procesos de modelado se encuentran determinados por los contextos socio-culturales, se desarrollan en interacción con los elementos del entorno y además están posibilitados y constreñidos por la biología del sujeto, que entiendo como el conjunto de las características físicas de razonador. Estas consideraciones tienen una directa repercusión sobre cuáles son las habilidades a desarrollar en un enfoque educativo orientado al aprendizaje de prácticas de modelado, como la importancia de la interacción con el entorno, físico y social, además de aquellas que están ligadas con la capacidad metacognitiva sobre las prácticas mismas de modelado. Una perspectiva del razonamiento como ésta convoca a una visión mucho integrada sobre como operan los procesos socio-culturales, físicos y mentales en el razonamiento humano.

1.3.4. El rol de la simulación en la elaboración y manipulación de modelos.

Una diferencia entre el planteamiento de Nersessian y Johnson-Laird es que la primera enfatiza la relevancia que tiene la capacidad de *simular* en la elaboración del modelado mental, mientras que Johnson-Laird destaca el carácter de análogos estructurales de los modelos. Esto último ya ha sido desarrollado a propósito de la definición de modelos, ahora se abordará el primer punto. La capacidad para simular esta enraizada en una habilidad más fundamental, la de imaginar, es decir, la facultad para poder representar en nuestra mente situaciones creadas o vividas, las cuales nos permiten proyectar acciones hacia el futuro, examinar nuestras experiencias, decidir, y, por supuesto, hacer inferencias. El rol de la simulación para el razonamiento según Nersessian (Nersessian, 2008) fue destacado anteriormente por Craik y constituye una de las diferencias fundamentales que distancian la propuesta del RBM con la idea de que el razonamiento opera bajo la aplicación de reglas de inferencia.

“Sostengo que las bases cognitivas para las prácticas del razonamiento basado en modelos exhibidas en los ejemplares, y empleadas amplia y variadamente por los científicos, yace en la capacidad humana para el pensamiento simulativo

a través del modelado mental. Esta capacidad está enraizada en la habilidad para imaginar – de representar en la mente – situaciones tanto del mundo real como imaginarias, y hacer inferencias acerca de los futuros estados de estas situaciones basados en las comprensiones actuales, con y en la ausencia de instanciaciones físicas de las cosas sobre las cuales se razona” (Nersessian, 2008, p. 91).

En la psicología la idea de que la simulación podría encontrarse a la base del razonamiento humano no es algo nuevo. Jean Piaget cuando elabora su descripción del desarrollo del pensamiento en el marco de su teoría epigenética, menciona la importancia que tiene el simular, cuando recién se comienzan a realizar los primeros procesamientos simbólicos a medida que el niño adquiere un lenguaje. El niño puede recrear situaciones en su mente, o crearlas imaginariamente a partir de lo que ha experimentado. En esta concepción se establece un nexo natural entre *imaginar* y *simular*. No obstante, la habilidad para simular no solo guarda relación con la capacidad de imaginar, sino también con la capacidad de imitar. El pensamiento simulativo surge de la imaginación y la capacidad de imitar a través de la imaginación. Ese es también un ingrediente relevante, e interesante, de la vida mental y las experiencias humanas. Según otra teoría de la psicología del desarrollo, imitar es la fuente más básica del aprendizaje humano. Albert Bandura (Bandura, 1977) destaca este factor en su teoría del aprendizaje por observación, la cual sostiene que además del aprendizaje activo, otra de las fuentes de nuevos repertorios de conocimientos y conducta humana se sustenta en la observación e imitación de las conductas realizadas por otros.

Que la capacidad para simular forma parte importante de nuestro repertorio de procesos cognitivos ha sido destacado al interior de las ciencias cognitivas. Cito como ejemplos el descubrimiento del rol de las *neuronas espejo* (Rizzolatti, 2004³) y la hipótesis del *marcador somático*. Las neuronas en espejo participan en la conducta imitativa del ser humano. Se activan tanto en el momento en que se ejecuta una acción consciente como cuando se observa a otro que la realiza. Esto implicaría, por ejemplo, que si combinamos la capacidad imaginativa con la imitación, es posible suponer un estado de cosas y experimentarlo como si lo estuviésemos viviendo. Por otra parte, el marcador somático es una representación física simulada, previa a la toma de decisiones y que se la considera un facilitador para evaluar alternativas y elegir entre éstas (Damasio, 1996⁴). Esta representación puede crearse a voluntad, como cuando imaginamos qué sabor de helado disfrutaríamos, pero también surge de forma automática, como el miedo que produce volver a enfrentarse a una situación traumática, o la sensación de paz al saber que nos reencontraremos con un ser querido. Según Damasio, el marcador somático facilita el razonamiento puesto que permite la asociación de un evento actual con la representación de un estado corporal asociado a una emoción que nos permitiría rotular una experiencia como buena o mala. De esta forma los marcadores somáticos contribuirían a una restricción en el proceso de toma de decisiones basándose en un análisis de beneficio-costos de las situaciones, haciendo uso de las experiencias previamente vividas. En ausencia de marcadores somáticos, el proceso de toma de decisiones se vuelve más engorroso y lento.

³ Cito esta publicación como referencia ya que se adjudica a Rizzolatti a Gallese y Fogasi, el descubrimiento de este grupo de neuronas. Hoy en día existe una vasta cantidad de estudios sobre el rol que tienen estas neuronas en el aprendizaje, en el lenguaje, en la empatía, las emociones, el autismo, entre otros temas.

⁴ Igual que en el caso de las neuronas espejo, cito este artículo de Antonio Damasio, autor de la hipótesis del marcador somático, como referencia. En la actualidad los estudios sobre este tema se focalizan en el fenómeno de la toma de decisiones.

Con lo anterior he intentado poner de relieve que existen varias razones para considerar que Nersessian está en lo cierto, y que la capacidad de pensamiento simulativo es básica para el surgimiento del RBM, en tanto que ésta se constituye como una de las operaciones básicas sobre el pensamiento humano en general.

El tipo de pensamiento simulativo que encarna la producción y manipulación de modelos mentales consiste en el reconocimiento y elaboración de análogos estructurales. Ahí se conectan naturalmente las visiones de Nersessian y Johnson-Laird. Este proceso de generación de análogos estructurales a su vez se sustenta en capturar los constreñimientos que dan forma a una determinada situación y plasmarlos en el modelo. En sus formas más complejas el razonamiento simulativo da cuenta de sistemas físicos, de modo tal que se preservan en el modelo los constreñimientos propios de la configuración espacio temporal de aquello sobre lo que se razona, pero además incorpora los conocimientos específicos que posee el razonador sobre las entidades, los comportamientos, los procesos y las relaciones causales en cuestión.

“Un “modelo mental” es una representación análoga estructural, conductual, o funcional de situaciones del mundo real o imaginarias, eventos o procesos. Es análoga en cuanto preserva los constreñimientos inherentes a lo que es representado”. (Nersessian, 2008, p. 93)

Dependiendo del punto de vista que se adopte, en lo que concierne a las teorías que expliquen el sustrato cognitivo del RBM, es posible juzgar como un defecto o una virtud el hecho que difícilmente sea reducible a una sola perspectiva en ciencias cognitivas. El eclecticismo presente a un nivel fundamental, deja entrever la dificultad que existe en las ciencias cognitivas de dar con un enfoque unívoco para explicar el razonamiento. No obstante, sostengo que la misma posibilidad de explicar los procesos cognitivos comprometidos en un fenómeno tan complejo como el RBM desde diversas propuestas teóricas deja la impresión de que existe una posibilidad de engranar estas explicaciones. Esta no es tarea que corresponda a este trabajo. Espero en este punto que el lector haya podido constatar que tal como quien observa un objeto desde diversos ángulos, en lo que concierne al estudio sobre RBM lo que aporta cada teoría introducida anteriormente contribuye a formarse una perspectiva más rica sobre cuales pueden ser las diversas explicaciones para comprender cabalmente este fenómeno.

1.4. El RBM: cómo opera y sus componentes.

Los modelos son un medio para representarnos situaciones complejas, reales o imaginarias, y así proyectar planes de acción o solucionar problemas. Como forma de introducir esta sección presento 6 ejemplos de resolución de un problema matemático realizado por niñas entre 9 y 10 años pertenecientes a 4to año de enseñanza básica. La principal instrucción consiste en que anoten en la hoja de respuesta todas aquellas cosas que tienen en mente, que piensan o imaginan, al resolver el problema. No en todos los casos se llegó al resultado correcto, pero es iluminador en el marco de este trabajo el tipo de representaciones que utilizaron para desarrollar su cometido. El problema que debían solucionar es el siguiente:

María, Felipe y Pablo son hermanos. Para navidad recibieron 15 regalos cada uno. Pero al abrirlos descubrieron que en realidad 8 de los regalos de Pablo eran

para María. Cuatro de los regalos de María eran para Pablo. Dos de los regalos de Felipe eran también para María y otros dos del mismo Felipe eran para Pablo. ¿Cuántos regalos recibió cada uno finalmente?

Estos ejemplos permiten ilustrar algunos aspectos relevantes del RBM que ya han sido destacados con anterioridad, y otros que serán expuestos en esta sección. En cada uno de los casos expuestos en las Fig. 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14⁵ se utiliza una representación diagramática con tokens amodales en su mayoría. Estas representaciones constituyen el vehículo a través del cuál se resuelve el problema. Difícilmente este problema podría ser resuelto sin recurrir a representaciones externas que apoyen el proceso de razonamiento. Por esta razón nos encontramos en presencia de un problema resuelto a través del *acople* de representaciones internas y externas. La organización estructural de los datos expresada a través de su posición espacial, la distinción en bloques, conjuntos y columnas, es un mecanismo que posibilita la ejecución más o menos expedita, según la habilidad de cada razonador, de la solución del problema.

Cada uno de los ejemplos es una evidencia de las diversas maneras en la que un razonador representa la información para resolver un problema y cómo dicha representación a su vez se convierte en la herramienta principal para resolverlo. Es interesante constatar que quizá esta variedad de representaciones remiten a formas en las que se les ha enseñado a resolver problemas matemáticos a las niñas que participaron de esta experiencia. Además cada diagramación remite a formas distintas de interpretar la información contenida en el enunciado del problema. De este modo, se pueden clasificar sus representaciones en dos grupos: aquellas, donde se utiliza la diagramación típica que se enseña para llevar a cabo los procesos de adición y sustracción, a las que se recurre en la mayoría de los casos (figuras 9, 10, 11, 12, 14), y otras, donde se opta por la diagramación en conjuntos donde los regalos son representados con símbolos que denotan la idea de una colección de objetos (figuras 8 y 13).



Fig. 8. Resolución de problema matemático a través de modelos.

⁵ Las figuras citadas se obtuvieron en una investigación realizada el año 2008 con alumnas de 4to años básico, durante el desarrollo de una investigación sobre el uso de metáforas y analogías en el razonamiento matemático. Un análisis posterior mostró la conexión de estas representaciones con el RBM.

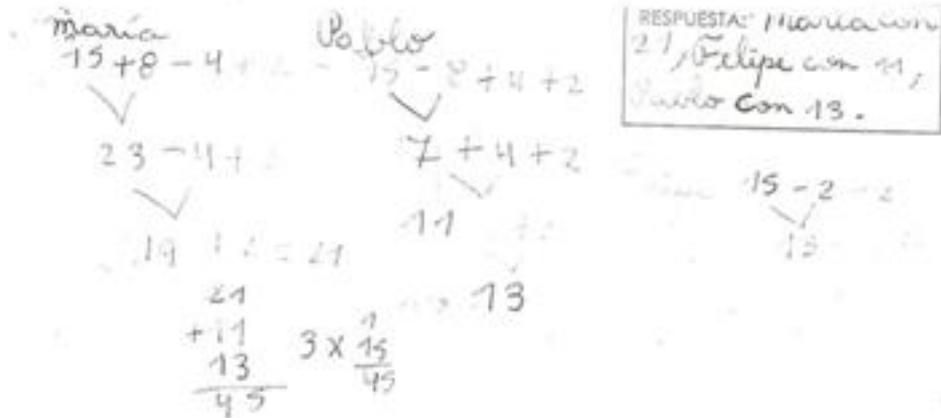


Fig. 9. Resolución de problema matemático a través de modelos.

En el primer caso (fig. 8), el modelo construido se focaliza en representar los tres grupos distintos que corresponden a los regalos recibidos por cada niño, a diferencia de la fig. 9 donde se pone mayor énfasis en evidenciar los procesos de adición y sustracción de los regalos. Aunque en ambos casos las niñas llegaron a la solución correcta, la forma en que representaron la información fue distinta. Esto destaca una característica de los modelos señalada con anterioridad, sobre la diversidad de formatos que estos pueden adquirir, principalmente debido a las preferencias o características del razonador, además de las que son determinadas por el problema en sí.

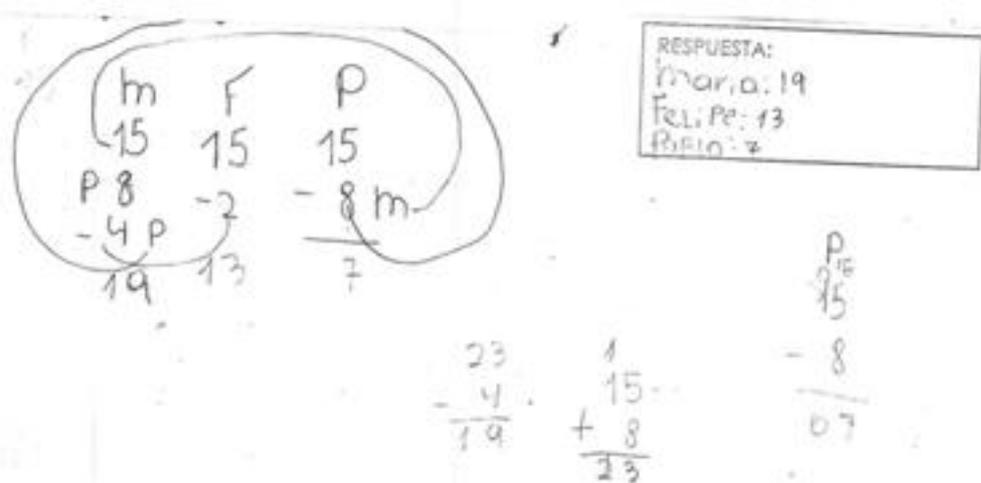


Fig. 10. Resolución de problema matemático a través de modelos.

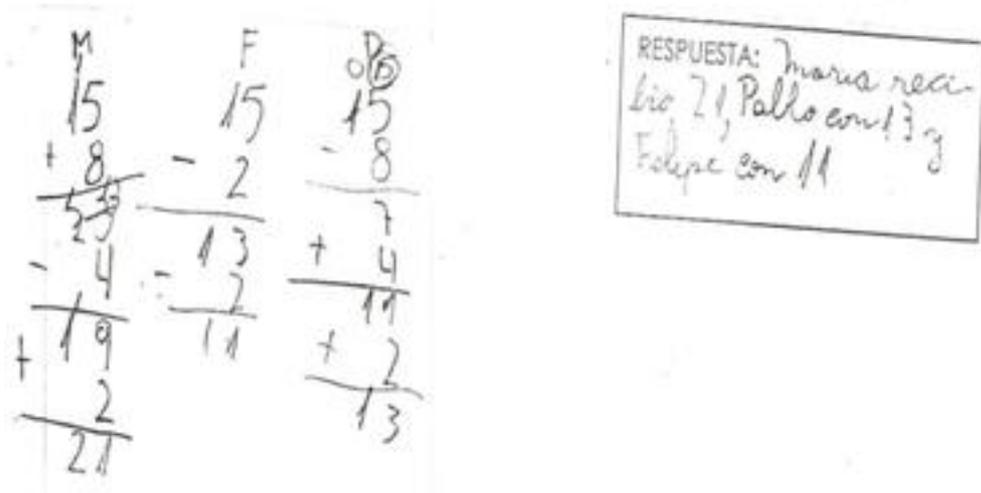


Fig. 11. Resolución de problema matemático a través de modelos.

Al comparar las figuras 10 y 11, se constata que en ambos casos el modelo aunque es estático, representa el proceso que conduce a resolver el problema, que es distinto para cada razonador. En la figura 10, las líneas que conectan una columna con otra indican como imaginariamente se traspasan espacialmente los regalos desde un niño a otro, es decir se evidencia un correlato con la experiencia sensorial más directa. Mientras que en la figura 11, la representación ilustra un proceso más abstracto de razonamiento. Lo que quiero destacar con esto es que los formatos de representación también dan cuenta de las preferencias o habilidades de razonamiento de los sujetos.

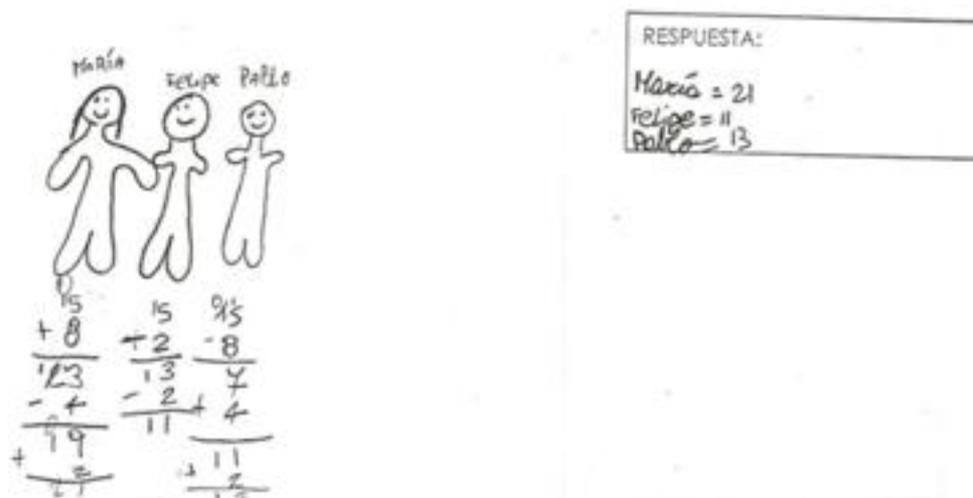


Fig. 12. Resolución de problema matemático a través de modelos.



Fig. 13. Resolución de problema matemático a través de modelos.



Fig. 14. Resolución de problema matemático a través de modelos.

Las figuras 12, 13 y 14 tienen en común el combinar en la representación elementos enunciados en el problema tanto concretos como abstractos. Son elementos concretos en la figura 12, los niños, en la 13 los conjuntos de regalos y los regalos mismos, y en la 14 los nombres de los niños y también los regalos. No obstante para resolver el problema es necesario constatar que los aspectos abstractos (la variación en las cantidades), son los que conducirán a la resolución correcta del problema. Entonces aquellas representaciones modélicas que incluyen elementos concretos de la situación descrita en el problema que no entorpecen la representación de la de la operación matemática involucrada, permiten una resolución del problema más expedita.

En las secciones anteriores se ha analizado el problema sobre el tipo de representación que es un modelo mental y diversas explicaciones sobre sus bases en la cognición humana. Con los casos recién analizados espero hacer un puente entre las consideraciones sobre los modelos por sí solos, con el rol específico que tienen en el razonamiento y cómo éste se estructura.

En esta últimas secciones de este capítulo me encargaré de exponer la forma como se desarrollan las prácticas de razonamiento en base a modelos, primero desde un punto de vista estructural general y luego haciendo referencia específica a diversas prácticas de modelado. Tal como se ha realizado anteriormente, se contemplan las perspectivas de Nersessian y Johnson-Laird como ejes articuladores entendiendo que éstas son complementarias, y que si bien guardan ciertas diferencias sobre el foco de interés en cada autor, considerarlas en conjunto contribuye a una perspectiva más completa sobre el tema en cuestión. Johnson-Laird en este punto aporta con una perspectiva sobre cuales son las fases críticas del RBM, es decir, a los momentos que estructuran desde una óptica general esta clase de razonamiento. Mientras que Nersessian realiza un análisis más detallado sobre como se articula, a partir del uso de diversas representaciones, el proceso de RBM.

1.4.1. Fases y estructura general del RBM.

El razonamiento es uno de los componentes centrales de la inteligencia humana. Conforme a la teoría de los modelos mentales (Johnson-Laird, 1983, 1989, 2001, 2005), nuestro razonamiento se conduce elaborando representaciones internas que guardan una semejanza estructural con situaciones del mundo. Esto permitiría explicar la forma en que razonamos en contextos reales dando relevancia al contenido semántico de las proposiciones y no a las conexiones lógico-sintácticas entre proposiciones como lo explicaría la lógica tradicional. De acuerdo con este autor la creación de un modelo permite explicitar información que se encuentra en las premisas que describen una situación, que de otro modo pasarían desapercibidas. Las estructuras de los modelos mentales se construyen para reflejar lo más fielmente posible las estructuras de los estados de cosas que representan, sean éstos percibidos o concebidos. Conforme a la teoría de los modelos mentales, hablar de RBM significa que el razonar es un proceso que está sustentado en los modelos mentales en tanto forma de representación básica que permite dar cuenta de la manera como entendemos el mundo. Decir que existe RBM no significa que éste constituya un tipo especial de razonamiento, sino que *es probablemente la forma principal de razonar humana*.

Una idea crucial dentro del pensamiento de Johnson-Laird es que si el razonamiento opera solo bajo la construcción de representaciones proposicionales en su concatenación lógica, sin hacer uso de modelos mentales, no existe una forma de explicar cómo se vincula el discurso con la experiencia del mundo. Cuando se entiende que los procesos inferenciales funcionan sobre la base de proposiciones el razonamiento solo puede ser explicado recurriendo al planteamiento de una lógica mental. Pero esto implica reducir el discurso sólo a sus aspectos sintácticos, ignorando que es el significado de las aserciones lo que le da su sentido. A esta idea el autor se opone, como ya se examinó anteriormente, sosteniendo que si bien la información puede adoptar una forma proposicional de representación, esta información es posteriormente interpretada semánticamente mediante un modelo mental. Los modelos mentales están basados en la interpretación del razonador por lo tanto contienen elementos extraídos de las experiencias vividas o imaginadas, que, como se ha indicado anteriormente en este capítulo, son un ingrediente fundamental del razonamiento.

Johnson-Laird define la inferencia como un proceso sistemático de pensamiento en que conduce desde un conjunto de proposiciones hacia otro (Johnson-Laird, 1989, p. 475), pero la forma en que se realiza ese proceso no es a través de la aplicación de reglas formales de razonamiento. Las personas para razonar construimos representaciones

de los eventos. Un modelo mental, como se vio previamente, está basado en la interpretación de los significados de las premisas y el conocimiento general, y permite, además, hacer explícita información que puede estar implícita en la formulación de un problema. Según Johnson-Laird (1983), el corazón del proceso de razonamiento está en la interpretación de información a través de modelos mentales, teniendo en consideración el conocimiento general que se posee, buscando contraejemplos e intentando construir modelos alternativos para confirmar la consistencia de las conclusiones extraídas.

Razonar en base a modelos mentales implica desde la óptica de Johnson-Laird el cumplimiento de tres tareas generales (Johnson-Laird, 1989). La primera de éstas es la *comprensión de las premisas*, o dicho de otra forma, de la fuente de estudio. Este proceso consiste en la construcción de un modelo mental que contiene una determinada interpretación de las premisas del problema. Esta representación, debe cumplir con ciertos requerimientos tales como respetar los principios de economía, semejanza estructural y funcionalidad, que ya han sido explicados en las secciones anteriores.

De los casos y ejemplos que ya han sido analizados en esta investigación, el proceso de *comprensión de las premisas* ha sido presentado desde diversas maneras. En el caso del diseño del cuchillo (figura 3) esto se lleva a cabo por medio de la interacción física que permite la construcción de un modelo inspirado en el acto de cortar, donde el proceso es altamente corporizado. En la resolución del problema matemático (figuras de la 8 a la 14), se muestra cómo la interpretación de las premisas de un mismo problema se representa de manera distinta por cada razonador y cómo eso repercute en la posibilidad para encontrar la respuesta correcta.

La segunda etapa consiste en *formular una conclusión* que sea consistente con la información representada en el modelo. Esto se logra por medio de la exploración del modelo, su reestructuración recursiva conforme a los conocimientos generales que se manejen y la información implícita en las premisas que se haga patente durante la manipulación del modelo.

Finalmente, la tercera etapa, una vez que se ha extraído una conclusión, esta se valida a través de la revisión del modelo. En las inferencia deductivas este proceso Johnson-Laird lo caracteriza (1989) como la *búsqueda de un contraejemplo*, es decir, hallar formas alternativas de modelar las premisas verdaderas donde la conclusión pueda ser falsa. La inferencia se constituye como válida en el caso que la conclusión no se muestre como falsa en ningún contraejemplo construido.

“Si una conclusión es verdadera en un modelo en curso, se realizan intentos para modificar el modelo recursivamente de manera que sea tanto consistente en las premisas e inconsistente en la conclusión. Si el procedimiento falla, entonces, por supuesto la inferencia es válida” (Johnson-Laird, 1983)

Por otra parte Nersessian en su libro sobre creatividad científica (Nersessian 2008) exhibe el proceso del RBM como estrategia generativa de nuevas representaciones científicas recurriendo al ejemplo del proceso que llevó a Maxwell a desarrollar su teoría sobre el campo electromagnético. Lo rescatable de esta cuenta, además del gran valor de la investigación histórica involucrada, es cómo la autora logra mostrar paso a paso cómo las representaciones modélicas van dando curso a la elaboración de nuevas concepciones científicas. La pregunta central es explicar cómo es posible que a partir de representaciones preexistentes logre surgir una concepción totalmente novedosa de un fenómeno. Lo singular del proceso de RBM llevado a cabo por Maxwell, y que Nersessian reconstruye, es que se evidencia la manera en que las analogías van allanando un territorio donde

se establecerán mapeos usando como base modelos denominados *híbridos*, es decir, modelos que dan cuenta de aspectos parciales e intermedios del fenómeno estudiado, pero que a lo largo del proceso de razonamiento permiten construir modelos que proporcionan una explicación novedosa para un fenómeno respecto del cual no habría una explicación satisfactoria. Para profundizar más en ejemplos, sugiero examinar las secciones 2.2 y 2.4. del próximo capítulo.

En sus investigaciones Nersessian ha detectado que el uso de *analogías*, *experimentos mentales* y *representaciones de imaginería* se presentan como herramientas significativas y útiles para la resolución de problemas en ciencia. Postula que son las prácticas de razonamiento *basadas* en estas herramientas las que conducen al cambio conceptual en las ciencias. Lo destacable de estos tres tipos de representaciones es que permiten una introducción de modificaciones en la representación de un fenómeno a partir de otras representaciones base. Por ejemplo, en el caso de las *analogías* los cambios se producen porque al establecer nexos entre los dominios de representación, la información de un dominio repercute la manera como se entenderá el otro. En el caso de la representación por *imaginería* se produce una modificación productiva cuando se transduce información que puede poseer otro formato previo, por ejemplo, proposicional, o cuando la representación se externaliza a través de una estrategia de visualización, como un esquema o diagrama. El poder de los *experimentos mentales* radica en ser un tipo de simulación mental donde se pueden proyectar modificaciones sin necesidad de recurrir a la experimentación, es el tipo de razonamiento del “¿qué pasaría si...?”. Estas son estrategias que en situaciones cotidianas todos utilizamos en mayor o menor medida. El uso de estas representaciones como base de un razonamiento implica un trabajo intelectual de considerable complejidad. En la últimas dos secciones de éste capítulo me referiré específicamente a cada una de éstas.

“Una vez que un modelo construido ha sido establecido como una representación adecuada, las inferencias que fluyen desde éste pueden ser transferidas al problema target. Este tipo de solución de problemas iterativa calza con la metáfora del un método de bootstrapping, y el proceso de satisfacción de constreñimientos provee la explicación para esa metáfora: cada dominio provee constreñimientos que pueden ser vistos como uno de los cordones, los modelos híbridos intermedios son los cruces de los cordones⁶, y cada cruce sustenta o contribuye a más construcciones modélicas y mejorar la comprensión del target” (Nersessian, 2008, p, 133)

El método de *bootstrapping* es la estrategia básica para la resolución de problemas. Nersessian a través de la metáfora del *bootstrapping* expone como concibe la operación del RBM. La metáfora de *bootstrapping* en general se refiere al acto de arrancar por uno mismo sin una base previa, solo sosteniéndose por los propios avances para construir algo o realizar una acción. Un ejemplo de esto sería construir los peldaños de una escalera a medida que se va subiendo por esta misma. En el ámbito financiero, se denomina *bootstrapping* al proceso de formar un negocio partiendo desde cero, apoyándose solo en los capitales que se van generando en el camino. Desde un punto de vista cognitivo el *bootstrapping* se utiliza para definir no solo el RBM sino para explicar cómo se produce el cambio conceptual, como el arranque de concepciones novedosas a partir de uso de los recursos que se adquieren en el mismo proceso de razonar sobre un problema..

⁶ Es difícil realizar una traducción literal del concepto de *bootstrapping*. El término remite a un episodio de las Aventuras del Barón Münchhausen, donde él es capaz de salir fuera de un pantano tirando de los cordones de sus propias botas.

Para explicar la relación entre el bootstrapping y el RBM extraigo dos puntos destacables de la cita anterior. Primeramente, el hecho que se diferencien los elementos que configuran la situación del RBM. Un dominio fuente, un dominio *target* y los modelos híbridos que son las construcciones que de forma progresiva conducen a la solución del problema. El dominio fuente se refiere a aquellas representaciones con las que el sujeto elabora y que guardan conexión con el hecho a explicar. El dominio objetivo o *target* es el problema o fenómeno a explicar. Mientras que los modelos híbridos son las construcciones modélicas realizadas conforme se detectan y evalúan las conexiones entre el dominio fuente y el *target*. Nersessian propone realizar un análisis del RBM en términos de la identificación e incorporación paulatina de constreñimientos (Véase en el próximo capítulo la sección dedica al caso S2, donde se expone un ejemplo de esto). De este modo son constituyentes del RBM el constatar constreñimientos, el *target*, la fuente y los modelos que progresivamente se elaboran, manipulan y evalúan durante el proceso de razonamiento.

La método de *bootstrapping* es el proceso en el cuál se construyen de forma iterativa modelos híbridos que se elaboran incorporando los constreñimientos que aportan los diversos dominios. Esto indica que el proceso a través del cual se desarrolla el RBM consiste en una construcción progresiva donde cada paso, salto o arranque (siguiendo la metáfora) se da con apoyo de uno de los dos dominios (fuente y *target*) según sus interrelaciones y constreñimientos descubiertos, y lo que se plasma a partir de esto en la elaboración iterativa de modelos híbridos.

A partir de lo expuesto se pueden destacar ciertas convergencias y diferencias en la manera como Nersessian y Johnson-Laird conciben el RBM respecto a su estructura general. Primeramente, respecto a las fases que lo conforman Johnson-Laird tiene una explicación muy definida sobre los pasos, que podrían denominarse como fases de *elaboración, aplicación, evaluación y ajuste*. Mientras que Nersessian destaca que el proceso se conforma por una construcción continua de modelos híbridos, determinada por la identificación e incorporación de nuevos constreñimientos, sin especificar tan radicalmente distintas etapas en el razonamiento. Si nos detenemos a considerar las implicancias de entender el RBM como un proceso de bootstrapping, hay que destacar que Nersessian tiene una concepción que va mucho más allá de rol en el razonamiento que tiene el RBM para la cognición humana. Con esto último me refiero a la conexión entre el RBM y el cambio conceptual. El bootstrapping además de describir el proceso de razonar en base a modelos también explica la generación de concepciones novedosas, la construcción de nuevas representaciones, no así Johnson-Laird que se concentra en el uso de los modelos como un medio para representar las premisas de un problema y resolverlo.

Haciendo una comparación, Johnson- Laird sostiene que los modelos permiten descubrir información que está implícita en la formulación de un problema, eso se asemeja con el hecho de incorporar nuevos constreñimientos, en la explicación de Nersessian. Elaborar un modelo sobre un dominio *target* X permitiría vislumbrar constreñimientos que probablemente pueden pasar desapercibidos sobre el problema solo con una evaluación inicial de la información. Si se hace un paralelo con en el esquema descrito por Johnson-Laird expuesto anteriormente, el proceso de elaboración de modelos híbridos a través de la incorporación de nuevos constreñimientos, se aplicaría a través de las tres fases del RBM, especialmente en las etapas de *comprensión de las premisas* y revisión de los modelos. Siguiendo la metáfora del *bootstrapping* cada avance estaría siguiendo una ruta que incorpora las secuencias de *elaboración, aplicación, evaluación y ajuste*. El proceso completo del *bootstrapping* consiste en la reestructuración continua de representaciones modélicas hasta que se alcanza aquella que se alza como la mejor para comprender

un problema. Más que forzar una lectura donde encajen perfectamente ambos enfoques sobre la estructura general del RBM, constato que ambos comparten una apreciación de este proceso donde se destaca interpretación de la información y la revisión de las construcciones modélicas.

Las prácticas científicas donde se utiliza el RBM poseen una gran complejidad y sofisticación, pero ésta viene dada más bien por las características mismas de los problemas sobre los cuales se razona, no tanto por la estructura en sí del RBM. De hecho como ya se ha destacado anteriormente no se puede establecer en una diferencia muy tajante entre los ámbitos expertos y las prácticas del uso común y corriente en la resolución de problemas. Nersessian en sus investigaciones ha constatado que esta separación es artificial en la práctica, porque en variadas ocasiones grandes científicos han extraído ejemplos desde el ámbito más cotidiano. Por ejemplo, la analogía y experimento mental descritos por Nersessian (Nersessian, 2008) en los que Galileo compara el movimiento de una piedra lanzada desde el mástil de un barco en movimiento con una pelota lanzada desde una torre en la Tierra. La habilidad experta para el RBM no requiere de desarrollar capacidades distintas de las que una persona común posee, y que utiliza en su vida cotidiana, sino que es preciso pulirlas y hacerlas más conscientes.

1.4.2. Construcción de modelos a través de analogías

Las analogías hoy en día son vistas como un medio a través del cual las personas realizan inferencias sobre las nuevas situaciones que experimentan. La analogía no cumple solamente un rol literario o ilustrativo. Es un recurso que permite razonar sobre situaciones nuevas o desconocidas tomando como referente aquello que ya se comprende o se conoce.

En la actualidad existe un amplio consenso sobre el rol cognitivo que poseen las analogías (por ejemplo ver: Gentner, 1983, 1998; Holyoak, Thagard, 1997) Para situar el rol cognitivo de las analogías es importante también remitirse a la teoría cognitiva sobre la metáfora (Fauconnier, 2008; Lakoff, Nuñez, 2000; Lakoff, Johnson, 2003; Rohrer, 2001). Parte de la base de que no existe una clara delimitación entre lo que se entenderá por metáfora de analogía en este contexto.

Usualmente, una metáfora se entiende como un fenómeno semántico, si partimos de la base que una metáfora consiste en designar o caracterizar algo con una palabra que se utiliza en un dominio distinto, como al decir “estás en la primavera de tu vida” o “nadó como un pez”. En ambos casos las palabras “primavera” y “pez” no corresponden a términos que se refieran literalmente a aquello con lo que se los relaciona en las oraciones. Cumplen la función de destacar o integrar características. Por otra parte una analogía se la define como una comparación donde se ponen de manifiesto las semejanzas entre dos dominios distintos. Como en la analogía: los colores y formas son para el pintor, lo que las palabras son para el poeta.

Aunque pareciera estar claramente delimitado qué corresponde a una metáfora y qué a una analogía, cuando se argumenta sobre el rol cognitivo que tienen, los autores antes citados coinciden en analizar los procesos de uso de metáforas y analogías definiéndolos en términos de establecer relaciones de proyección y transferencia de información desde un dominio a otro. Esto hace que las diferencias entre metáfora y analogía se vuelvan más difusas. Una forma de solucionar este problema es asumir que las metáforas establecen el nexo primero entre dos dominios de experiencia, donde quizá se encontraría el primer brote de la creatividad, y la analogía consistiría en el proceso del razonar comparativamente estableciendo relaciones e inferencias a partir de los dos dominios que primeramente

fueron conectados en la metáfora. No entraré en más detalles sobre este punto, pero constato que para efectos de esta investigación he considerado que ciertas investigaciones sobre metáforas, específicamente las que se tratan sobre *metáforas conceptuales*, usan el término metáfora para referirse a algo muy parecido a la analogía en el contexto del RBM.

Considero como ejemplo de esto la propuesta de Lakoff y Nuñez sobre la relación entre las metáforas y el desarrollo del pensamiento matemático expuesta en su obra *Where Mathematics Comes From* (Lakoff, Nuñez, 2000). Esta obra responde a un cuestionamiento de carácter epistémico que puede ser expresado de la siguiente manera: ¿de dónde proviene nuestro conocimiento de lo que llamamos matemáticas? Los autores sostienen que las matemáticas tal como las conocemos provienen de nuestra experiencia corporizada en el mundo. Las nociones matemáticas escalan, a medida que avanzan en su complejidad, hacia terrenos cada vez más abstractos, pero los primeros escalones de esa ascensión, o más bien los cimientos de esas elucubraciones abstractas tienen su fuente primera en la experiencia corporizada y situada en el mundo. Las metáforas, serían por así decirlo, el andamio que posibilitaría tal ascenso o construcción desde lo concreto hacia lo abstracto. Las metáforas permiten acceder paulatinamente al conocimiento abstracto. Tal como se representa en los dos casos siguientes (Fig. 15 y 16), donde se diagraman dos metáforas que son básicas para la elaboración del conocimiento matemático. Las ideas representadas por conjuntos unidos por flechas indican los mapeos que se establecen entre un dominio de la metáfora con el otro. Dicha forma de entender ese mapeo puede ser perfectamente entendida como un tipo de razonamiento analógico. Esta última idea quedará más clara en los párrafos siguientes, cuando explique en qué consiste razonar en base a analogías.



Figura 15. Metáfora básica de las matemáticas 1 (Lakoff y Nuñez, 2000)



Figura 16. Metáfora básica de las matemáticas 2 (Lakoff y Nuñez, 2000)

“La idea habitual de la resolución de problemas a través de la analogía es que uno reconoce algunas semejanzas entre la situación problemática bajo consideración (target) y algo con lo que uno está familiarizado y es mejor comprendido (recuperación de la fuente). Uno crea, entonces, un mapeo entre los dos que permite la solución del problema original (mapeo y transferencia). En el proceso, es posible que la fuente y el target necesiten ser representados más abstractamente con el propósito de que la comparación o el mapeo sean hechos” (Nersessian, 2008, p. 135)

Examinando el contenido de las figuras 15 y 16 se constata que existe una convergencia entre la descripción del uso de una analogía presente en la cita de Nersessian y los ejemplos de las metáforas conceptuales en matemáticas. La representación en conjuntos y flechas puede ser vista como una manera de diagramar el proceso de transferir información. Sin embargo también se aprecia que esta forma de representar a través de este tipo de diagrama el uso de analogías es imprecisa, porque deja fuera el hecho de que los mapeos se hacen sobre la base de las relaciones y constreñimientos explicitados en cada dominio.

Nersessian plantea que la capacidad de establecer analogías está enraizada en la habilidad para encontrar patrones coincidentes y reconocer semejanzas en el entorno, que sería común a todos los animales vertebrados. Sitúa específicamente alrededor de los 5 años el asentamiento de esta capacidad en el ser humano y que es explotada por los niños para comprender dominios de experiencia desconocidos haciendo inferencias en base a cosas que ya conocen. Una característica central del conocimiento desarrollado a través de una analogía radica en el mapeo que se efectúa entre el dominio fuente y el dominio target. El dominio fuente corresponde a la situación conocida en la que se han identificado ciertas semejanzas con el target (el dominio del problema en cuestión) que eventualmente serían relevantes para su comprensión. El mapeo consiste en el proceso de ir entrecruzando

las inferencias establecidas en el dominio fuente hacia el dominio *target*. Cito un ejemplo presentado por la propia Nersessian sobre el modelo atómico de Rutherford. Este recoge información de un dominio fuente: el Sistema Solar, y se mapea hacia el dominio objetivo: el átomo. En este caso la analogía funciona estableciendo que los componentes del átomo se pueden representar estructural y espacialmente de modo similar a como se disponen los constituyentes del Sistema Solar. En el ámbito de la teoría del conocimiento, el célebre “giro copernicano” del que habla Kant en su prólogo a la *Crítica de la Razón Pura*, es también un mapeo desde dos ámbitos distintos del conocimiento: aquellas inferencias que fueron fértiles para el desarrollo de la astronomía lo pueden ser también para la filosofía. El entrecruzamiento base sería la combinatoria del cambio desde una perspectiva geocéntrica a una heliocéntrica y el cambio en filosofía desde una perspectiva realista, *centrada en el objeto*, a una idealista, en el sentido moderno del término, *centrada en el sujeto*.

Por supuesto, una analogía tiene sus límites. Se establece a partir de relaciones de semejanza, no de identidad, y si hemos de hablar de identidad solo es en términos especulares respecto a cómo se estructuran los estados de cosas en cada dominio, fuente y *target*. Es por eso también que al utilizar una analogía es preciso elaborar representaciones simplificadas o abstractas de los dominios en cuestión, donde se destaquen aquellos puntos donde la comparación es fértil. Pienso, por ejemplo, en la misma metáfora de la mente con un computador y la subsecuente analogía. Dicha metáfora, que da origen a un sinnúmero de investigaciones y postulados que han alimentado ricamente a las ciencias cognitivas, si se lleva a un extremo puede conducir a conclusiones, por decir lo menos, problemáticas; por ejemplo, afirmar que los seres humanos fuimos diseñados y programados por una entidad superior, o postular que los computadores piensan porque son capaces de procesar información llegando a resultados similares o idénticos al nuestro (como ocurre en el debate en filosofía de la IA acerca de si una máquina puede pensar o no), o caer en la falacia de establecer relaciones causales donde quizá no las hay. En este sentido parte de la experticia en el uso de las analogías radica en saber hasta donde usarlas y cuándo desecharlas, como una escalera que nos conduce a un cierto nivel, pero que no sirve para acceder a otros. Esto guarda directa relación con la capacidad de detectar con agudeza los constreñimientos de cada dominio, entendiendo que éstos no son solo fuente de limitaciones, sino que aportan con los criterios necesarios para representar lo más acertadamente un determinado estado de cosas.

La elaboración de una explicación o solución final a un problema, o esclarecimiento del dominio *target*, es algo que ocurre a través de una secuencia progresiva de pasos. Tal como lo describe Nersessian con el uso de la metáfora del *bootstrapping* ya explicada, la información desde el dominio fuente no siempre es directamente mapeada en el problema *target*. Sino que el dominio fuente provee de información que junto a la del dominio *target* sirven de constreñimientos que van dando forma a los *modelos híbridos*, los cuales son intermediarios que también incluyen sus propios constreñimientos en base a lo que los razonadores mismos piensan en el proceso. El concepto de *modelo híbrido* tendrá especial importancia para los enfoques didácticos de educación con RBM, esto será expuesto en el segundo capítulo.

“Después de que cada modelo es construido, los comportamientos dinámicos del modelo son determinados y entonces el modelo es evaluado respecto de su acomodación a las dimensiones de interés en el target. En cada caso, las inferencias son hechas desde el razonamiento con el modelo y transferidas y evaluadas con respecto al objetivo inicial, con las metas e interpretaciones en roles guías. Así un modelo híbrido, que en sí mismo está construido sobre

la base de una analogía, sirve como base de comparación con el target y provee la base para las soluciones del problema para ser usadas en inferencias analógicas” (Nersessian, 2008, p. 144)

Los modelos híbridos, como representaciones intermedias entre el dominio fuente y el dominio target, proveen los contextos propicios para hacer avanzar el proceso de razonamiento y extraer inferencias. Éstos encarnan constreñimientos que a su vez permiten explorar nuevas combinaciones de constreñimientos, entendiendo estos últimos como un conjunto de principios, pautas a seguir para la construcción de una representación sobre la base de la interpretación de los rasgos salientes para resolver el problema desde del dominio fuente y target inicialmente. Los modelos híbridos representan constreñimientos que no parecen evidentes ni en el dominio fuente ni el target en un principio; son representaciones mediadoras que tienen un rol fundamental en la secuencia del bootstrapping.

Además del establecimiento de los dos dominios que se conectan a través de su estructura especular, existen tres procesos cruciales en la utilización de las analogías como base para el RBM que ya han sido mencionados: *recuperar*, *mapear* y *transferir*. En una primera instancia, la *recuperación* opera como la identificación o hallazgo del dominio fuente sobre el cuál se establecerán las relaciones analógicas cruzadas. El *mapeo* se refiere a la operación de identificación de las relaciones significativas observadas en un dominio y que se vislumbran con semejanza estructural con el otro dominio. Y la *transferencia* es el momento en que la información proveniente del análisis de un dominio se ocupa para realizar inferencias en el otro.

Recuperar (retrieval) el dominio fuente no siempre es una tarea fácil. De hecho en gran medida la inventiva científica podría ser explicada por esta misteriosa habilidad. A través de la psicología cognitiva y constructivista se ha constatado que la información previa a la que las personas están expuestas determina la clase de asociaciones a las que recurren para solucionar un problema. Esto se aprecia bastante bien en un caso experimental considerado como ejemplar sobre el uso de las analogías para la resolución de problemas (Nersessian, 2008). La situación experimental esta conformada por dos grupos de personas que deben dar solución a un problema: como extinguir un cáncer donde es imposible realizar una extirpación directa sin dañar otros órganos. A un grupo se le presentó previo al problema una historia sobre las fortalezas, mientras que al otro no. Sorprendentemente ocurrió que los sujetos que fueron expuestos a la historia utilizaron esta información para resolver el problema. En el relato se narra cómo un ejército se dispuso a atacar una fortaleza enemiga usando una estrategia que evitara dañar a los poblados aledaños, dividiéndose en grupos muy pequeños y atacando la fortaleza desde diversos frentes. Lo que ocurrió fue la generación de una solución al problema a partir de una comparación analógica entre como atacar efectivamente una fortaleza desde diversos frentes y destruir un cáncer atacándolo desde diversos ángulos. Este caso ejemplifica la idea que Nersessian sostiene a través de sus distintas investigaciones: que las analogías surgen espontáneamente a partir del conocimiento con el cuál los sujetos se encuentran familiarizados. En la recuperación, por lo tanto, tiene vital importancia la base de conocimientos con los que cuenta el razonador, y su flexibilidad para reconocer asociaciones generativas entre diversos dominios.

Los procesos de *mapeo* y *transferencia* involucran reconocer estructuras relacionales en los dominios. A este respecto Nersessian da cuenta de la existencia de dos enfoques distintos sobre cómo se lleva a cabo este proceso de mapeo y transferencia estructural. Uno de estos es privilegiar el ordenamiento sintáctico de los componentes de cada dominio, mientras que el otro reconoce la importancia de las pautas contextuales y de

contenido. Ambas presentan relevantes contribuciones a la comprensión del proceso del RBM, aunque, ciertamente, es la segunda la que se condice más con la línea de este trabajo de Nersessian.

La primera fórmula Nersessian se la adjudica a Dedre Gentner, conocida por investigaciones sobre el rol de las metáforas y las analogías en la cognición. De acuerdo explicación de Nersessian, dicha autora propone tres criterios para el mapeo de estructura, que según Nersessian, tienen amplia aceptación dentro de la investigación en ciencia cognitiva. El primero de éstos es el foco estructural, el segundo es la consistencia estructural y el tercero la sistematicidad. Respectivamente, cada uno se refiere a: la preservación de las estructuras relacionales, hacer mapeos consistentes en su estructura isomórfica y la interconexión de estructuras relacionales entre mapeos de sistemas de alto nivel. De este análisis se extrae lo relevante que es para Gentner el foco en el mapeo efectuado sobre estructuras relacionales. De hecho este criterio puede ser de utilidad para determinar si una analogía es adecuada o no en términos del calce estructural existente entre los dos dominios que componen la relación analógica. El tercer criterio también es iluminador. Al realizar mapeos estructurales entre sistemas interconectados, es ventajoso determinar cuales son las relaciones de alto nivel, es decir, las que tienen una mayor importancia y que eventualmente orienten el desarrollo de los mapeos subsecuentes. Esto se aplica sobre todo en casos donde a través de un razonamiento analógico se busca dar solución a un problema que implica poner en juego conocimientos desde distintos ámbitos de la experiencia, o bien es un problema que contiene muchas aristas.

Desde la óptica de Nersessian el problema que queda abierto por el análisis de Gentner es explicar cómo precisamente llegan a elegirse las relaciones que serán comparadas. Digamos en este punto que Gentner aportaría con un criterio para evaluar la calidad de un mapeo analógico, cuando ya se han escogido los elementos a relacionar especularmente, pero no como éstos llegan a ser seleccionados. Thagard y Holyoak, otros investigadores que se han concentrado en el estudio de la analogía, aportarían con un punto de vista distinto, donde es de particular relevancia la información semántica y pragmática, pues desde allí se llevará a cabo la selección de aquellos componentes y relaciones estructurales que serán de relevancia para la conexión analógica. Nersessian destaca su concordancia con esa visión.

“... la interpretación de los constreñimientos del target y las metas del problema target guían la selección de constreñimientos salientes candidatos para la transferencia hacia los dominios fuente. Esto, a su vez, provee constreñimientos adicionales para la construcción de modelos a través de los cuales el encargado de solucionar el problema razona sobre el fenómeno en cuestión” (Nersessian, 2008, p.150).

Los constreñimientos que son la base para la construcción de modelos híbridos, también tienen un rol significativo. Hay que entenderlos como características propias de cada dominio que moldean el proceso de selección de los aspectos relevantes para establecer las relaciones estructurales y las transferencias de un dominio hacia otro. Las analogías en su rol en el RBM no solo permiten una transferencia directa desde el dominio fuente hacia el *target*, sino que, además, permiten aproximarse al conocimiento del dominio *target* cuando es poco lo que se conoce de éste. Es decir, que a través de la misma relación analógica es posible construir una representación modélica que satisfaga los constreñimientos ya conocidos y que permita aproximarse paulatinamente hacia el *target*. Este es el rol de la representación modélica intermedia, *híbrida*, entre el dominio fuente y *target*. Desde allí surgirán las inferencias y relaciones necesarias para ir avanzando en la comprensión de

fenómeno estudiado hasta llegar a un modelo adecuado del dominio *target*. Este proceso, la construcción de representaciones modélicas intermedias, es tan relevante como los tres procesos descritos anteriormente: recuperación, mapeo y transferencia.

Un ejemplo sencillo de esto se puede encontrar en las representaciones diagramáticas que combinan elementos icónicos y amodales, como ocurre en la Fig.15, sobre el proceso de transmisión del potencial de acción desde una neurona a otra. La figura muestra el soma de la neurona imitando una suerte de tubo con compuertas de entrada y salida, a través de las cuales se produce el intercambio de sodio y potasio, según varíen los niveles de calcio al interior de la neurona. He aquí una representación modélica que se origina en la analogía de la neurona como una tubería que posee canales de ingreso o salida, y la representación de los componentes expresados en la nomenclatura propia de la química. Este es un ejemplo de representación modélica intermedia porque no representa directamente cómo es una neurona y cómo realmente se lleva a cabo el proceso de transmisión del impulso nervioso (cosa que aprenderá con mayor exactitud solo el biólogo experto), pero permite generar una comprensión aproximada del *target* en cuestión tomando como referentes los constreñimientos de los dominios de la analogía y a la vez convirtiéndose en un medio válido para propiciar en el razonador futuras comprensiones de fenómenos más exactas y exhaustivas.

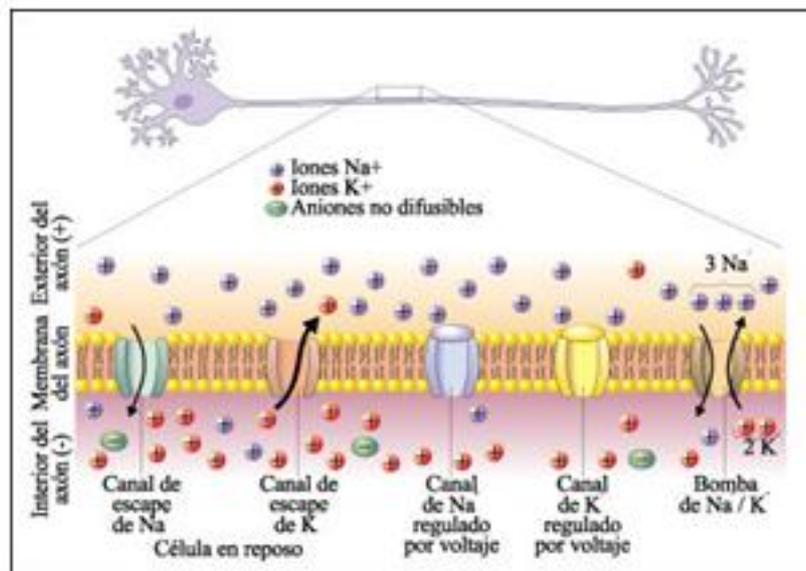


Fig. 17. Transmisión del potencial de acción.

<http://www.psicofarmacos.info/?contenido=varios&farma=dexedrina>
21/06/2011]

[Consulta:

1.4.3. El rol de las representaciones de imaginaria en el RBM.

Las representaciones de imaginaria incluyen las simulaciones visuales, los diagramas (esquemáticas, bocetos, dibujos, etc.), y experimentos mentales que el razonador elabora en su mente y también aquellas que construye de forma externa para apoyar su propia tarea o para comunicar sus ideas a otros. En esta sección final me referiré a los dos últimos tipos, entendiendo que la simulación visual es un tipo de representación que combina las características de los diagramas y los experimentos mentales.

Cuando representan hechos dinámicos, los modelos pueden adoptar la forma de una abstracción del proceso y también representar instantes del proceso como si fuesen “fotografías” que capturan sucesos relevantes para la investigación. Existen representaciones de imaginería que contienen componentes amodales y que se complementan con elementos visuales con características modales, como en el diagrama de la Fig, 17 recién examinada, donde se representa la membrana de la neurona (modal) en conjunto con información sobre la carga eléctrica de los elementos químicos (amodal). Esto aporta una nueva fuente de constreñimientos que colabora con construir una representación mucho más certera. Además, durante el procesamiento visual es posible activar los circuitos asociados a otras fuentes sensoriales y desencadenar representaciones motoras, en caso que la representación de imaginería también describa movimientos o pautas de conducta.

Sobre el rol específico que tienen las representaciones de imaginería externas en el RBM, primeramente, éstas sirven para alivianar la carga de información que se procesa en la memoria de trabajo. Siguiendo de este modo la idea expuesta anteriormente donde se afirmaba que las representaciones externas forman junto a las internas un sistema *acoplado* que se enriquece mutuamente, la elaboración de una representación de imaginería externa, como los diagramas, facilita el procesamiento de la información.

Una de las ventajas de los diagramas, argumenta Nersessian, es la de posibilitar la generación de modelos mentales compartidos en una comunidad de investigadores. De hecho no es necesario que el modelo que el razonador tiene en su mente sea expresado en una representación externa en el mismo formato o con la misma complejidad. Depende más bien del propósito que el investigador tiene para tales efectos. Las representaciones diagramáticas, al parecer, son las preferidas por los científicos. Éstas forman parte del proceso de razonamiento no solo porque sirven para ilustrar lo que los investigadores tienen en mente, sino que en sí mismas se convierten en un material de investigación que aporta con nuevos constreñimientos y nuevas posibilidades efectivas (*affordances*) en el examen de un problema. Sobre este punto es preciso constatar que no da lo mismo la forma como se decida diagramar un determinado problema. Esto traerá consecuencias en el curso de la investigación, la encauza, por así decirlo. En las prácticas científicas las representaciones diagramáticas cobran una relevancia en tanto constituyen un lenguaje común a través del cual se representan la información para la discusión en la comunidad científica, como lo ejemplifican las figuras 18 y 19.

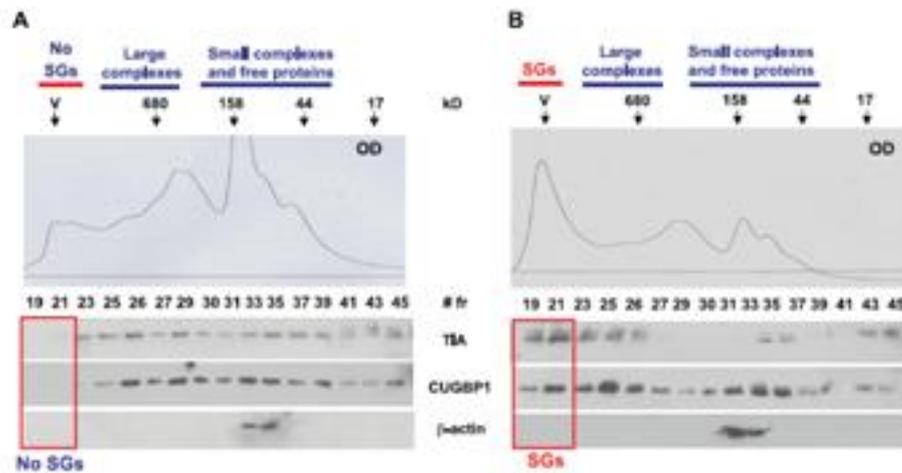


Figure 5. Ectopic expression of the mutant CUG₅₁₄ RNA causes formation of SGs containing CUGBP1 and TIA-1. Cytoplasm from uninduced (A) and induced (B) CHO TRE4GFP-CUG₅₁₄ cells was subjected to size exclusion chromatography (SEC400 column, HPLC, Bio-Rad) to separate free TIA-1 protein from TIA-1 bound to SGs. Top panels: optical density (OD, A₂₈₀) profiles of chromatography fractions. Arrows indicate positions of molecular weight markers used for calibration of column. Blue lines indicate chromatography fractions, typically containing small and large complexes and free RNA-binding proteins. Fractions 19–23 contain SGs (marked with red boxes in bottom panels). Note that the OD profile shows that the fractions 19–21 in inducible cells (B) contain large peak in the position of SGs. Bottom panels: expression of CUG₅₁₄ RNA shifts TIA-1 and CUGBP1 to the region containing SGs (indicated by red box). Chromatography fractions were sequentially analyzed by Western blotting with Abs to TIA-1, CUGBP1, and β -actin. Reprobe of the filters with Abs to β -actin shows that expanded CUG repeats do not change localization of β -actin.

Fig.18. Resultados de investigación en biología molecular. (Huichalaf, C. et al., 2010)

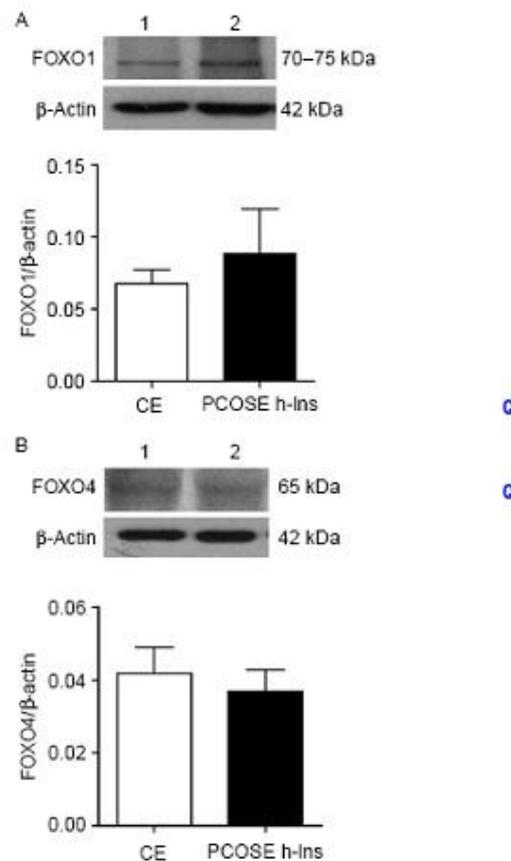


Figure 1 Western blot analysis of protein levels of FOXO1 and FOXO4 in endometria from CE and PCOSE h-Ins. Equal amounts of protein (50 μ g) were loaded in each lane. FOXO1 (A) was detected as a band with a molecular mass between 70 and 75 kDa, and FOXO4 (B) was detected as a band with a molecular mass of 65 kDa. Band intensities were quantified by scanning densitometry and normalized to intensities observed for β -actin as internal control. Lane 1, CE; lane 2, PCOSE h-Ins. The results are expressed as arbitrary units (AUs), and the values shown are means \pm s.e.m. in CE ($n=7$) and PCOSE h-Ins ($n=7$).

Fig. 19. Resultado de investigaciones en biología reproductiva.. (Kohan, K. et al. 2010)

Las figuras 18 y 19 las presento como ejemplos de diagramaciones que son comunes en la investigación científica y que están presentes en la mayoría de las publicaciones. En este caso las representaciones visuales tienen la función explícita de comunicar los resultados de una investigación a la comunidad científica. Estas constituyen formas de presentar la información a través de una determinada disposición de los datos, que sea fácil de entender pero a su vez que cumpla la función de contener toda la información relevante asociada al problema. Destaco esto porque representaciones diagramáticas como las expuestas en las figuras 18 y 19 contienen una gran cantidad de información, pero que el público experto puede rápidamente comprender precisamente por la manera en que ésta es presentada (a diferencia por ejemplo de una descripción escrita de cada uno de los detalles). Los diagramas utilizados en la investigación científica tienen un rol tanto en la comunicación de ideas y resultados de la investigación y como soporte para el desarrollo mismo de futuras investigaciones.

Gran parte de la experticia propia de un investigador en ciencias radica en su capacidad para interpretar y construir representaciones diagramáticas. Los diagramas ayudan a la

organización de la actividad cognitiva durante la solución de problemas. Desde un punto de vista pedagógico esto justifica la utilización de diagramas para comprender mejor ciertos procesos. Como por ejemplo contar con diagrama que represente las interacciones que ocurren en un circuito eléctrico para comprender los principios de la conducción de la electricidad (como se presentó en la figura 7).

“Existe una amplia evidencia que la percepción activa de diagramas durante el razonamiento provee información situacional a la memoria de trabajo que interactúa con el modelo mental y participa directamente en el razonamiento. Las representaciones internas y externas son mejor entendidas como “acopladas”, cada una provee sus propios constreñimientos y affordances, de tal modo que las características de las representaciones externas hacen contribuciones directas a las transformaciones de los modelos mentales y viceversa. Dependiendo de cómo sean construidas pueden facilitar o impedir la solución del problema” (Neressian, 2008, p. 166).

Las representaciones de imaginería, especialmente los diagramas, pueden, eventualmente, tener una participación significativa en la producción del razonamiento analógico porque facilitarían hacer evidente la disposición estructural de los componentes de un fenómeno para efectuar los mapeos correspondientes. También puede hacer confluír en una misma representación información proveniente de diversas fuentes. Aunque es necesario destacar que las representaciones diagramáticas cuando son muy complejas o sofisticadas son de utilidad solo para quienes poseen la capacidad de interpretarlas, construirlas y utilizarlas. Saber construir e interpretar significativamente una representación diagramática requiere de dominio de ciertos conocimientos sobre la disciplina de estudio en la que se enmarca la actividad cognoscitiva.

Los *experimentos mentales* son una clase de representación de imaginería basada en la simulación que consiste en la creación de un modelo mental donde se proyecta un estado de cosas hipotético para examinar lo que ocurriría si acontecen ciertas manipulaciones o variaciones. Implica que en el razonamiento participan la capacidad de imaginar, anticipar, visualizar y experimentar información rescatada desde la memoria sobre datos perceptuales y motores, además de la utilización de conocimientos generales y específicos del área de investigación. Por lo tanto, la elaboración de un experimento mental puede ser considerada como una tarea de alta complejidad para el razonador no experto. Un experimento mental puede ser útil para realizar conjeturas, es decir, para determinar qué hechos son posibles dadas ciertas circunstancias hipotéticas. Ahora, ¿por qué recurrir a un experimento mental y no a uno “real”? Un experimento mental está constreñido por las características conocidas de dominio a estudiar, pero no tiene las limitaciones físicas de experimentación que normalmente existen. Por ejemplo, basándose en las leyes de la física se puede conjeturar como se comportará un objeto en la superficie de Marte, sin necesidad de estar allí.

A lo largo de la historia de la ciencia existe un amplio repertorio de experimentos mentales. Los *gedankenexperimenten* se presentan en la historia del pensamiento desde la época Antigua, tomando su mayor fuerza con Galileo, Newton y Leibniz. El nombre fue introducido por Ernest Mach a fines del S. XIX para designar al conjunto de experimentos imaginarios realizados en el ámbito del pensamiento científico. Como forma indirecta de experimentación, los experimentos mentales gozan de una amplia aceptación por su contribución al desarrollo de perspectivas novedosas en ciencia, sean éstas planteadas desde un punto de vista positivo, para afirmar o sustentar una determinada teoría, o también para elaborar críticas y cuestionamientos. Se ha destacado por ejemplo la importancia

de los experimentos mentales en la fertilidad científica de Albert Einstein. Se piensa que éstos tuvieron una gran influencia en los desarrollos de su teoría de la relatividad general y especial, como también en la elaboración de su visión crítica dirigida a Bohr sobre la mecánica cuántica.

Los experimentos mentales permiten investigar la naturaleza sin tener que recurrir a la intervención directa en la realidad. Esto contrasta con la visión popular acerca de que la ciencia obtiene su credibilidad por medio de la experimentación empírica. Efectivamente, el valor de los experimentos mentales radica en la posibilidad de imaginar estados posibles de cosas, que se condicen con las leyes de la naturaleza, pero que escapan a nuestras limitaciones espacio-temporales. Lo interesante de los experimentos mentales es que en rigor no trabajan con información nueva. Se elabora un constructo hipotético a partir de datos conocidos, asumiendo que lo que para el pensamiento sea una consecuencia necesaria, lo será también en caso de ocurrir este hecho en la realidad. En este sentido se sustentan en la existencia de un paralelismo entre el pensamiento y la realidad.

La narrativa de un experimento mental es uno de sus aspectos más relevantes. Esta permite experimentar imaginariamente una situación. Naturalmente, mientras mejor es, es decir, más clara, ilustrativa y exacta respecto de las características que describe sobre el estado de cosas imaginario, su valor epistémico será mayor en tanto que permitirá acceso a información o consideraciones que de otra manera no habrían sido posibles de capturar. Es esa narrativa la que conduce a la elaboración del modelo. Un modelo de experimento mental es un sistema conceptual que representa el sistema sobre el cual se razona, no es solamente una forma de representar lo que la narrativa del experimento relata, sino que a partir de esa narrativa representa los aspectos salientes relacionados que el fenómeno problemático. Desde una óptica pedagógica la importancia de utilizar experimentos mentales está en que aportan la posibilidad de pensar mundos posibles y de situarse imaginariamente en experiencias que son imposibles de obtener directamente. Sobre la base de un experimento mental se puede proyectar situaciones, evaluar la pertinencia de ciertas conclusiones, aportar nuevos constreñimientos para analizar los problemas, etc.

1.5. Recapitulación.

A continuación realizaré una síntesis de las ideas centrales que se presentaron en el Capítulo 1.

Según lo desarrollado en este capítulo, los modelos mentales son representaciones que posibilitan la comprensión e interacción en el mundo para organismos evolutivamente más complejos, que han desarrollado un sistema nervioso capaz de transducir información sensorial en información computable por la mente a través de representaciones. Esta capacidad permite la resolución de problemas, la anticipación de escenarios y la toma de decisiones. La principal fuente de los modelos mentales es la información sensorial, pero los modelos pueden adoptar formatos tanto modales como amodales, y ser divididos en físicos y conceptuales según el tipo de información que representen.

***“¿Cómo pensamos? Una respuesta es que nos apoyamos en modelos mentales.
La percepción produce modelos del mundo que yace fuera de nosotros.
Una comprensión del discurso produce modelos del mundo que el hablante***

nos describe. El pensar, lo que nos permite anticipar el mundo y elegir un curso de acción, se apoya en las manipulaciones internas de estos modelos mentales” (Johnson-Laird, 2005, 185)

Los modelos mentales tienen un papel fundamental en la manera como conocemos. Tener un modelo mental sobre los procesos que entretengan la experiencia del mundo es equivalente a portar una comprensión de éste. Desde la perspectiva de Johnson-Laird, conocer un fenómeno, comprenderlo, implica la posesión de un modelo mental que lo representa en su estructura.

“Si conoce lo que causa un fenómeno, lo que resulta de éste, cómo influenciarlo, controlarlo, iniciarlo o prevenirlo, cómo se relaciona con otros estados de cosas o cómo se le asemeja, como predecir su comienzo y curso, cuál es su “estructura” interna o subyacente, entonces hasta cierto punto lo entiende” (Johnson-Laird, 1983, p. 2)

La importancia de los modelos como forma de representar y razonar sobre el mundo se hace evidente cuando se examina el rol que tiene el contenido semántico de la información que procesamos. La teoría de los Modelos Mentales y el Razonamiento Basado en Modelos se oponen a la visión tradicional del pensamiento humano que considera que las operaciones sobre la base de reglas pertenecientes a una lógica mental son la principal fuente de inferencias correctas, porque reconocen que es el contenido y la estructura en que se presenta en un determinado estado de cosas lo que principalmente determina el razonamiento.

Un modelo es un tipo de representación que mantiene una relación de semejanza estructural con el mundo. Los modelos mentales facultan a los individuos para entender fenómenos, haciendo inferencias y predicciones, decidir qué acción tomar y controlar su ejecución. Un modelo mental es entendido como una forma de representación que simula y efectúa un paralelo con la realidad a través de semejanzas estructurales sostenidas entre su contenido y la realidad que representa.

Los modelos son herramientas al servicio de razonadores que deben desenvolverse en ámbitos complejos de experiencia. Su generación y utilización involucra el desarrollo de habilidades cognitivas basadas en una utilización de los recursos de memoria de trabajo, interpretación del lenguaje e integración de las prácticas de razonamiento con las experiencias sensoriales y motrices.

Los modelos se distinguen como un modo singular de representación debido a su potencial para representar sistemas físicos y conceptuales complejos, y por permitir la resolución de problemas y la generación de ideas. El proceso de modelado mental involucra el uso de repertorios de experiencias almacenados en la memoria, la elaboración de nexos entre diversos dominios de conocimiento y el uso de la imaginación. Las prácticas cognitivas más sobresalientes involucradas en el modelado son las simulaciones, la elaboración de analogías, la imaginación y los experimentos mentales.

La creación y manipulación de modelos es un proceso progresivo, que está sometido a constante evaluación. Esta forma progresiva de razonar se ilustra a través de la metáfora del *bootstrapping*, con la que se intenta destacar que las prácticas de modelado se sostienen en un proceso continuo de creación de modelos híbridos que integran constreñimientos desde el dominio a investigar. La experticia científica radica en la sofisticación de una habilidad común que los humanos poseemos para razonar en contextos cotidianos.

Los modelos permiten hacer evidente información que de otro modo permanecería oculta para el razonador o también simplificar el proceso de análisis de la misma al utilizar diversas modalidades de representación, tanto internas como externas. Los modelos pueden ser entendidos como estrictamente mentales en la medida que se ejecuten y utilicen solo al interior de la “caja craneana”, pero también se consideran modelos todas las representaciones externas que surgen de la actividad de modelado realizada por la mente en acople con la realidad externa.

El RBM es entendido como una práctica que conduce a la generación de concepciones novedosas en ciencias. Esto debido a que las prácticas que lo configuran son estrategias que permiten la elaboración de nexos entre dominios de información, la elucubración de estados posibles de cosas, que de otra manera quedarían ocultos a la investigación. La creatividad científica se explica a través del proceso iterativo de elaboración de modelos híbridos que confluyen hacia la elaboración explicaciones de hechos que contienen perspectivas novedosas. Como forma de entender el razonamiento desde un marco que persigue dar cuenta de la creatividad, el RBM aporta con una perspectiva rica respecto a la consideración sobre los procesos cognitivos y estrategias específica ligada al desarrollo de la creatividad, conjeturo, no sólo científica.

1.6. Conclusión.

La primera parte de este trabajo estuvo dedicada a la exposición y explicación de los aspectos que he considerado relevantes dentro de la Teoría de los Modelos Mentales y el Razonamiento Basado en Modelos (RBM). Se ha mostrado cómo dichas perspectivas de análisis sobre cómo opera el razonamiento humano son compatibles, complementarias y que juntas otorgan una visión acerca de cómo los humanos comprendemos y explicamos la realidad sin recurrir a una explicación del razonamiento que implique la posesión y/ o utilización de algún tipo de aparato lógico mental. La propuesta sobre RBM traza claramente un camino alternativo para comprender el razonamiento, el cual da cuenta no solamente sobre cómo resolvemos problemas en el ámbito más cotidiano, sino también en aquellos contextos socioculturales de producción de conocimiento. Siguiendo el análisis de Nersessian importantes teorías que componen el saber científico pueden ser explicadas en su origen a partir de operaciones con RBM. Las prácticas de RBM conducen a la elaboración de ópticas novedosas que se traducen en lo que Nersessian denomina “el cambio conceptual”, momento crucial en la elaboración de nuevo conocimiento.

“Ex nihilo, nihil fit” es la clásica frase que resume la idea de que para que algo exista debe haber algo que sea su fuente de origen. “Nada surge de la nada”, idea que suele atribuirse a Parménides, refleja la dificultad que existe para constatar que algo puede surgir sin ningún fenómeno que lo anteceda. Más allá del embrollo metafísico que este pensamiento involucra sobre el origen del mundo, pienso que es útil para iluminar un fenómeno esencial para la producción del conocimiento al que apunta el RBM: la creatividad. La perspectiva del RBM sostiene que la creatividad no es una iluminación que de pronto invade las mentes de los científicos, si bien puede ser que el momento de ocurrencia de una idea se manifieste de esa forma, sorpresivamente. La creatividad, o la generación de visiones o soluciones nuevas sobre un problema, es más bien un proceso paulatino, a través del cual la mente del investigador realiza conexiones entre las diversas ideas que tiene a su disponibilidad. Todo esto apunta a indicar que el proceso creativo

es constructivo, donde el razonador toma desde su entorno y desde la información que conforma su capital de saberes previos aquello que le servirá para producir un “cambio conceptual”. El pensamiento detrás de todo esto es que aquellos razonadores que son capaces de elaborar perspectivas creativas sobre las cosas, no poseen una habilidad mágica o una suerte de iluminación divina, sino una capacidad bien entrenada - ya sea de forma consciente y deliberada, o fruto del curso de su vida – para establecer conexiones singulares entre la información que utilizan.

Los dos puntos desarrollados anteriormente sugieren, complementariamente, que la capacidad de comprender y explicar la realidad desde nuevas ópticas no implica solamente el poseer una habilidad formal de razonamiento, tal como se entiende desde una perspectiva clásica. La creatividad deja de situarse en el terreno de lo meramente artístico o místico, sino que se concibe como un proceso que está incorporado en todos los ámbitos de la producción cultural humana, que incluso forma parte de nuestra cotidianidad como razonadores.

En el siguiente capítulo se evidenciará cómo la teoría sobre RBM se aplica en educación a través de la explicación y análisis principalmente de algunos trabajos de John Clement. El propósito principal es mostrar cómo la teoría sobre RBM se plasma tanto en propuestas didácticas concretas, la identificación de estrategias cognitivas y en la planificación de unidades de enseñanza y aprendizaje. Mediante la presentación de casos y ejemplos, en el segundo capítulo también se podrá constatar más específicamente cómo ocurre el proceso del RBM en la comprensión de fenómenos y la solución de problemas.

Capítulo 2. Razonamiento Basado en Modelos en la Educación: Análisis de una propuesta.

“¿Qué quiere decir eso: pensar científicamente? En su aspecto fundamental, significa preguntarse por uno mismo las preguntas que los científicos se preguntan por ellos mismos, estar atento a los aspectos problemáticos de la propia experiencia de la forma en que los están los científicos, reflexionar autocríticamente acerca de los procedimientos propios igual que lo hacen los científicos, y descubrir como valioso, no sólo para la propia vida, el hecho de que si una distinción debe ser establecida, se convierte en urgente que uno la establezca, y que si una conexión debe ser hecha, se convierte en urgente que uno la haga”

Mathew Lipman, Prólogo al Manual de Kio Y Gus

El primer capítulo de este trabajo consistía en mostrar que la teoría de los Modelos Mentales y el RBM constituyen enfoques definidos y sólidos para explicar ciertas tareas de razonamiento que son cruciales para la vida humana y que, además, son consideradas valiosas culturalmente, como el caso específico de la producción de conocimiento científico. Dicho propósito se desarrolló situando estas teorías en el ámbito más amplio de investigación en ciencias cognitivas buscando mostrar a través de eso la pertinencia de esta propuesta teórica como explicación de los procesos de razonamiento humano. En esta segunda parte, el propósito es examinar cómo dicho enfoque sobre el razonamiento ha servido para configurar propuestas orientadas a la educación en ciencias. En este capítulo se encontrará una caracterización de los aspectos centrales de la propuesta instruccional de John Clement e investigadores que siguen su misma línea de trabajo, la elección de este autor se basa en que cita como referentes teóricos de su trabajo a Nersessian y Johnson-Laird. En lo que sigue se analizan estrategias particulares que han sido identificadas como parte del proceso de RBM, y que se vislumbran como factibles de aplicar en el contexto de la enseñanza de las ciencias. Además evidencia como la teoría del RBM permite la articulación de una propuesta curricular para la enseñanza de las ciencias. Comenzaré en la primera sección algunos conceptos y aclaraciones básicas.

2.1. El proceso de RBM visto desde una óptica instruccional.

Establecer una relación entre ciencias cognitivas y educación a primera vista pareciera ser algo sencillo de hacer, bajo el supuesto de que existe una transición natural entre un nivel de explicación de los procesos cognitivos y un nivel de aplicación de dichos conocimientos para producir tales procesos. Esto no es necesariamente así. Existe una considerable brecha entre describir y dar cuenta de las causas de un fenómeno y tener el potencial

para producirlo, sobre todo cuando se trata de temas tan complejos como el aprendizaje y la educación. En este sentido es interesante examinar cómo la teoría del RBM se busca plasmar a través de propuestas didácticas y curriculares para la enseñanza de las ciencias. Desde el frente de la educación, una crítica que puede hacerse a las teorías psicológicas que suelen citarse como referentes importantes para la educación – como las de Piaget y Vygotsky – es que se quedan en el nivel de explicación de los procesos cognitivos implicados en el aprendizaje, pero queda la tarea para quienes se dedican a la educación de elaborar orientaciones pedagógicas que sean congruentes con los postulados teóricos de dichos autores. Como espero mostrar en lo que sigue, la teoría sobre el RBM carece de este defecto. Tanto por el fundamento teórico y experimental que esta teoría posee como por las teorías generales sobre la cognición que son compatibles con ésta, pienso que se convierte en un referente importante para iluminar las prácticas educativas. Al final de este trabajo presentaré algunas reflexiones sobre este punto en particular.

En el caso concreto del RBM y educación, Nersessian contribuye notablemente (Nersessian, 2008) al mostrar cómo se desarrolla la resolución de problemas utilizando prácticas de modelado, examinándolas paso a paso. Las investigaciones de John Clement siguen esta misma línea, poniendo a prueba la efectividad que puede tener en el aprendizaje un enfoque como el RBM con la puesta en marcha de unidades de aprendizaje según los lineamientos de esta teoría. Primeramente, la pregunta importante de responder es cuál específicamente es el rol asignado a los modelos y las prácticas de modelado en la educación, es decir cómo la teoría de RBM se implementa en educación. En lo que sigue se denominará Enseñanza y Aprendizaje Basado en Modelos (EABM) a la orientación teórica y experimental que inserta el RBM en las prácticas pedagógicas.

Es relevante aclarar la diversidad de significados que puede adoptar el término “modelo” en el contexto de EABM. Con el término ‘modelo’ no solamente se hace referencia a una clase de representación mental, sino también a una determinada ideología, forma de pensar o incluso una manera de hacer las cosas. Por ejemplo, es relevante para la propuesta de EABM el caso puntual de los *modelos expresados*. Estos corresponden a los modelos individuales comunicados públicamente. Considerar este tipo de modelo es importante porque finalmente cuando queremos indagar en las representaciones modélicas que utiliza un razonador solo accedemos a sus *modelos expresados*, sin tener la exacta certeza que éste corresponda fielmente a sus *modelos mentales* (recordemos el análisis realizado al respecto sobre la figura 1). Además el término “modelo” se utiliza en educación con diversas acepciones. Comenzaré, por lo tanto, por presentar una clasificación de las formas en las cuales puede ser utilizado el concepto de modelo en el contexto de la EABM. Tener en cuenta esta clasificación es importante sobre todo para evitar errores conceptuales.

Primeramente, en el ámbito de la educación, con *modelo curricular* se hace referencia al estilo que puede adoptar una determinada propuesta curricular según las teorías sociológicas, psicológicas, políticas, etc., en las que se fundamente o según los fines - económicos o éticos, por ejemplo - que se persiga con su aplicación. Además, se denomina *modelo de enseñanza* a una determinada manera de llevar a cabo la práctica educativa en aula, en consecuencia con alguna propuesta teórica o práctica sobre los fines de la educación o la psicología del aprendizaje.

En el contexto de EABM se destaca la referencia a *modelos conceptuales*, *modelos mentales*, los recién mencionados *modelos expresados* y los *modelos híbridos*. Un *modelo conceptual* se define como el producto de la actividad científica, el reflejo del resultado de

investigaciones al interior de la comunidad científica y que evidencia una determinada forma de representar los fenómenos o las teorías formuladas en ciencias.

Los *modelos mentales* - que se han examinado en gran parte del primer capítulo de este trabajo - son representaciones análogas estructurales de los fenómenos. Son construcciones intramentales o externalizadas, estáticas o dinámicas, abstractas o basadas en la percepción, que se utilizan para comprender fenómenos y razonar.

Los *modelos expresados* (Buckley, Boulter, 2000) corresponden a la comunicación pública de los *modelos mentales* elaborados por un razonador común. Se diferencian de los modelos conceptuales en que estos no son aprobados por una comunidad científica, sino que es la presentación “externa” que hace un sujeto de los modelos con los cuales razona a través de diagramas, verbalizaciones, gestos, etc. Se los distingue de los *modelos mentales* teniendo en cuenta la brecha que puede existir entre lo que un estudiante efectivamente comprende y representa mentalmente de aquello que es capaz de comunicar externamente de acuerdo a sus habilidades.

Finalmente, los *modelos híbridos* son las representaciones conceptuales intermediarias entre los *modelos conceptuales* propuestos por los científicos y los *modelos mentales* o *expresados* por los alumnos en un contexto pedagógico. Estos suelen ser presentados intencionadamente por el docente a cargo de un proceso de EABM en una ruta de aprendizaje prediseñada, o pueden ser elaborados por los mismos alumnos en el proceso de crear su propia representación mental.

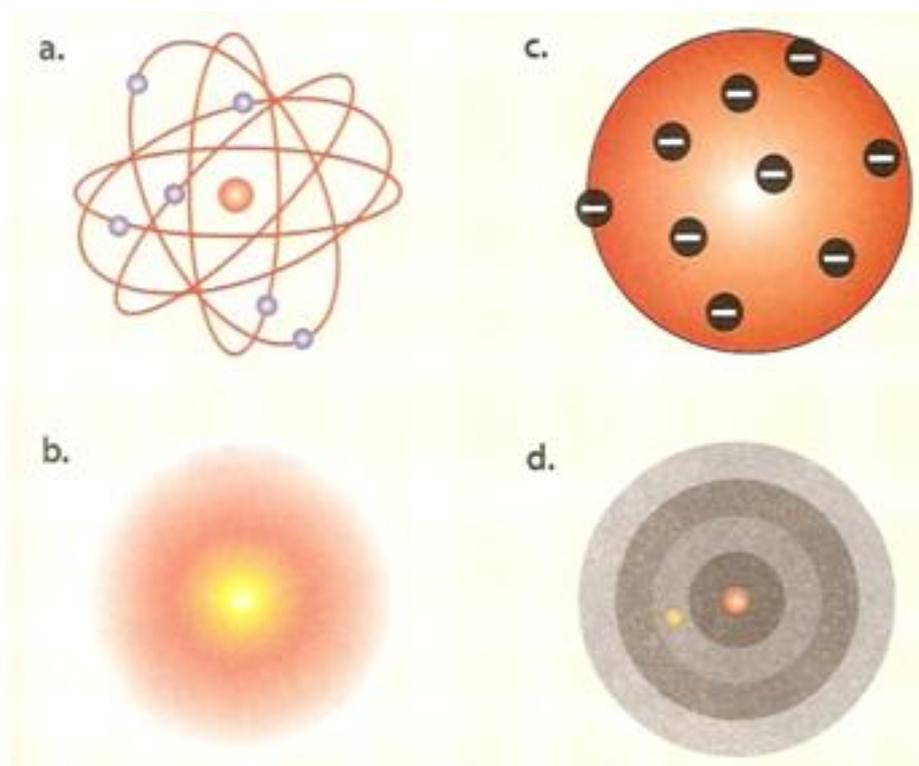


Fig. 20. Modelos atómicos en un texto escolar. (Cabello, 2011)

En la figura 20 se exhiben cuatro imágenes extraídas de un texto escolar de primero medio. Cada una de éstas se utiliza para representar cuatro modelos atómicos distintos, es decir cuatro *modelos conceptuales* sobre la estructura del átomo. De acuerdo a las definiciones recién planteadas, estas imágenes presentan más bien *modelos híbridos*,

es decir, representaciones que han sido simplificadas para que sean accesibles a los estudiantes según sus conocimientos, con el propósito que ellos logren generar sus propios *modelos mentales*.

La EABM opera principalmente sobre la base de los *modelos expresados* por los estudiantes, fomentando la construcción de *modelos mentales* que se aproximen lo más posible a los *modelos conceptuales* propuestos por la comunidad científica. Los *modelos híbridos* son en este contexto aquellas representaciones modélicas que permiten encauzar las representaciones ingenuas de los alumnos hacia las expertas. Esto se asemeja al rol de los modelos híbridos en el proceso del bootstrapping, solo que en el contexto de EABM, los modelos híbridos no son necesariamente construidos por el razonador, sino que pueden ser presentados por el docente, para apoyar el proceso de elaboración de modelos.

La propuesta de EABM se fundamenta en la idea de que la formación científica escolar (Clement, 2009) consiste principalmente en fomentar la capacidad de los estudiantes para razonar siguiendo el camino que conduce a los científicos a la elaboración nuevas concepciones. Esto se aleja de la concepción más corriente de acuerdo a la cual poner en práctica las habilidades de pensamiento científico se logra a través de la aplicación del método científico en investigaciones de laboratorio. La propuesta sobre EABM, da un paso más allá mostrando que no solo basta con hacer buenas observaciones y análisis para elaborar conocimiento científico, sino que es preciso además desarrollar la habilidad para comprender la información desde ópticas diversas, con flexibilidad de pensamiento, teniendo en consideración la relevancia del uso de representaciones modélicas y el RBM en general.

La principal contribución que se vislumbra desde la teoría sobre RBM a la educación es la claridad con la que se proponen estrategias para conducir formas de aprendizaje constructivo, significativo y creativo a la vez. Constructivo, porque considera que las representaciones modélicas son elaboraciones del individuo. Significativo, porque se sustenta en el conocimiento que el razonador tiene de la realidad y sus posibilidades de interacción con ésta. Y creativo, porque incorpora estrategias para la generación de nuevas ideas. Es importante no olvidar, además, que el RBM asume que el cambio conceptual, si bien puede ser generado por un solo razonador, un gran científico, la innovación conceptual en ciencias también es el producto de la colaboración de una comunidad organizada de investigadores que al paso del tiempo van contribuyendo a la producción de conocimiento. Con esto quiero destacar que la EABM tiene como sustrato una forma de entender el aprendizaje basado en procesos de razonamiento que incorporan aspectos cognitivos individuales y también aquellos que dependen de la interacción con el entorno y con otros razonadores.

2.2. El Caso S2 y algunas lecciones sobre cómo orientar procesos de enseñanza y aprendizaje basados en modelos.

En esta sección se expone el caso S2, que consiste en un estudio ejemplar sobre cómo se lleva a cabo una práctica de RBM, en tiempo real, con análisis de registros de la actividad del razonador a través de la metodología “think aloud”. Con la presentación de este caso

se busca ilustrar como se produce paso a paso la generación de una idea, lo que servirá de base para examinar las propuestas sobre EABM.

Con S2, se hace referencia al protocolo seguido por un sujeto para resolver un problema. Este sujeto participó de una investigación realizada por John Clement sobre las estrategias de razonamiento implicadas en la resolución de un problema específico, el “Problema del Resorte”. En esta investigación participaron 10 sujetos quienes poseen una formación avanzada en algún campo técnico o científico (en física, matemática o ciencias de la computación). S2, es un sujeto que captó particularmente la atención de Clement (2009) y Nersessian (2008), porque además de ser uno de los cuatro sujetos que llegó a la respuesta correcta al problema, consiguió a través de la formulación, evaluación y modificación de sucesivos modelos analógicos la generación de una concepción nueva para él. S2 condujo su proceso de razonamiento sobre el problema hasta llegar a una innovación conceptual, que fue crucial para su comprensión del fenómeno implicado en el problema. Este caso reviste un importante registro sobre como se conduce un proceso de RBM en una ordenada secuencia de pasos.

El “Problema del Resorte” es el siguiente:

“Un peso es colgado de un resorte. El resorte original se reemplaza por otro resorte:

- Hecho del mismo tipo de alambre,
- Con el mismo número de espirales,
- Pero con espirales que son dos veces más anchos de diámetro.

¿Estirará este resorte desde su longitud natural, más, menos, o la misma cantidad bajo el mismo peso añadido? (Suponga que la masa del resorte es despreciable en comparación a la masa del peso añadido)

¿Por qué piensa eso?” (Clement, 2009, p. 26)

La estrategia utilizada por los investigadores es el análisis de los registros diagramáticos y kinésicos del procedimiento usado por S2, y los relatos de “think aloud”. Estos consisten en solicitarle al sujeto de investigación que reproduzca en voz alta sus pensamientos mientras está llevando a cabo la solución del problema. Sobre esto último, es relevante constatar que una de las limitaciones que se proyecta en los protocolos de investigación basados en el “think aloud” es estrechar la brecha entre el lenguaje usado para dar a conocer el pensamiento de los sujetos y lo que efectivamente están representando en sus mentes, especialmente cuando estos no tienen dominio sobre el tema desde un punto de vista experto y de la terminología apropiada para una comunicación fluida. Otro punto relevante sobre esta clase de registro es la imposibilidad de presentar una representación externa que comunique fielmente los modelos diagramáticos y/o dinámicos generados mentalmente. Esto corresponde al mismo problema mencionado en la sección anterior sobre los modelos expresados.

Como ya se indicó, S2 despertó el interés en investigadores porque su caso es ejemplar sobre la manera de razonar a través de modelos, analógicos primordialmente. Según las descripciones del caso presentadas por Nersessian (2008) y Clement (2009), S2 encontró rápidamente la solución al problema del resorte aunque de forma intuitiva: el resorte con espirales más amplios se estiraría más. Pero el sujeto no se conformó con eso, ya que no podía justificar esa intuición, basada probablemente en una simulación mental. S2 continuó su proceso de razonamiento obstinadamente hasta encontrar una explicación sobre cómo funciona un resorte.

Partiendo de la base de que los modelos se estructuran en virtud de los constreñimientos que son parte del fenómeno investigado, tal como se expuso en el capítulo 1, Nersessian postula que S2 formula sus modelos evaluando su ajuste a los constreñimientos del problema en cuestión. El proceso se enriquece a medida que S2 descubre constreñimientos implícitos, que lo animan a modificar o desechar sus representaciones primeras.

Los constreñimientos explícitos del problema según Nersessian (2008, p. 68) son:

1. Los cables son del mismo tipo en ambos resortes.
2. El número de espirales es constante en ambos casos
3. El ancho del espiral es distinto en cada caso
4. La masa del resorte es constante
5. El peso añadido es constante

S2 elabora 5 modelos consecutivos distintos para dar respuesta al problema. A continuación haré una revisión del proceso que lo condujo a la elaboración de cada uno, recogiendo elementos de la exposición de Nersessian y Clement.

El primer modelo consiste en una simplificación del fenómeno a representar, estableciendo una relación analógica entre una barra de alambre con el resorte. S2 imagina que un resorte al ser estirado puede ser como una barra de alambre que, a su vez, al ser enrollada se asemejaría a un resorte. A partir de esto, concluye que la pendiente que se forma en un espiral o en un rollo de alambre aumenta en la medida que la vuelta del espiral se aleja del borde. Esto lo conduce a la respuesta al problema planteado por los investigadores: el resorte de espirales más amplios se estirará más. Es interesante notar que la conclusión a la que llega es producto de una simulación mental en dos dimensiones del comportamiento del resorte y la barra de alambre enrollada.



*Fig. 22. Modelo 1. Un resorte al ser estirado es como una barra de alambre.*⁷

En este momento S2 fundamenta su modelo considerando solo los constreñimientos que aluden al material con el que está hecho el resorte, su estructura superficial, pero no su forma de operar. S2 reconoce esta falencia y se plantea a sí mismo el desafío de explicar cómo funciona un resorte. La observación que lo condujo a rechazar este modelo y reformularlo consistió en constatar que la pendiente de flexión en ambos casos, en el resorte y un alambre convertido en espiral, no es la misma. En un resorte la pendiente de cada espiral es constante al aplicar un peso; en cambio, en el alambre enrollado la pendiente aumentaría a medida que los espirales están más cerca del peso. Eso lo impulsa a querer descubrir cuál es el mecanismo que está detrás de la forma cómo opera un resorte. Lo que

⁷ Las figuras de los modelos reproducen las presentadas por Clement (2009). Estas constituyen simplificaciones de los modelos que S2 utiliza, basados en los dibujos que realiza durante el proceso de RBM. Imágenes de algunos de los dibujos hechos por el mismo S2 se encuentran en el análisis de Nersessian (2008).

permite a S2 extraer estas conclusiones es la creación de un modelo de simulación que no solamente es visual, como se representa en la fig. 22 sino que además incluye, como el mismo S2 reconoce (Nersessian, 2008), un sentido kinésico, que externaliza a través de trazados en el aire con sus manos.

Para la construcción del segundo modelo, S2 ya cuenta con otro constreñimiento a considerar: la pendiente del resorte permanece igual en diferentes partes del resorte. Además de esto existe un insight relevante que surge de los conocimientos en geometría de S2: la forma de espiral en un resorte puede ser una característica accidental, un resorte también puede estar enrollado siguiendo la forma de un cuadrado. (S2 aplica continuamente durante esta experiencia sus conocimientos en topología)

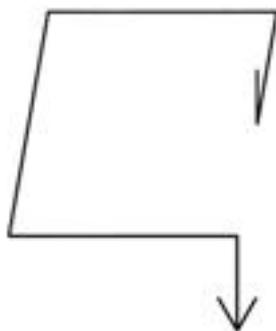


Fig. 23. Transición de modelo 1 al 2. Resorte cuadrado.



Fig. 24. Modelo 2. Resorte zigzag.

Esto a su vez lo conduce a considerar un nuevo constreñimiento: un resorte podría estar hecho a partir de segmentos repetidos. Así, el segundo modelo (Ver Fig. 24) que elabora S2 representa a un resorte como si este fuese un cable en zigzag. Nersessian cataloga este modelo como híbrido debido a que considera aspectos tanto del resorte, objeto final del problema, como del primer modelo construido por S2. Este es un modelo bidimensional que se focaliza en los aspectos estructurales de un resorte. No obstante, este modelo falla al dar cuenta de un constreñimiento implícito descubierto anteriormente que se refiere al ángulo de la pendiente: la distribución uniforme del estiramiento. A través de

este modelo no se puede explicar por qué en cada giro del espiral del resorte existirá una flexión idéntica. Además, también es insuficiente en otro aspecto fundamental: no explica el comportamiento del resorte (de estirarse y retraerse a su posición original) sino sólo representa la posibilidad de que el resorte posea diversas formas. Es interesante hacer notar que la reflexión de S2 se mantiene en el ámbito de las consideraciones geométricas.

El tercer modelo consiste en la representación de un cable con conectores rígidos (Fig. 25). Esto, según Nersessian, con el propósito de integrar el último constreñimiento descubierto sobre la forma del resorte. Pero se descarta rápidamente este modelo porque no cumple con el constreñimiento referido a la distribución uniforme del estiramiento.

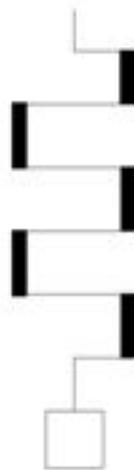


Fig. 25. Modelo 3. Resorte de conectores rígidos.

El cuarto modelo se basa en la reformulación de una idea que determinó la construcción del modelo 2: geoméricamente, al parecer, que un resorte esté compuesto de espirales es irrelevante. Además, S2 introduce el concepto de fuerza del resorte, asunto que hasta ahora no había considerado, y constata que la tensión de la curvatura del resorte se comprende mejor desde un plano horizontal. Como se hace evidente al considerar un resorte con forma helicoidal (Ver Fig. 26) Lo interesante de destacar es que en este momento, si bien las consideraciones de S2 se siguen fundamentando en los aspectos geométricos del problema, ahora se introduce una visión en tres dimensiones que le otorga más concreción al modelo.

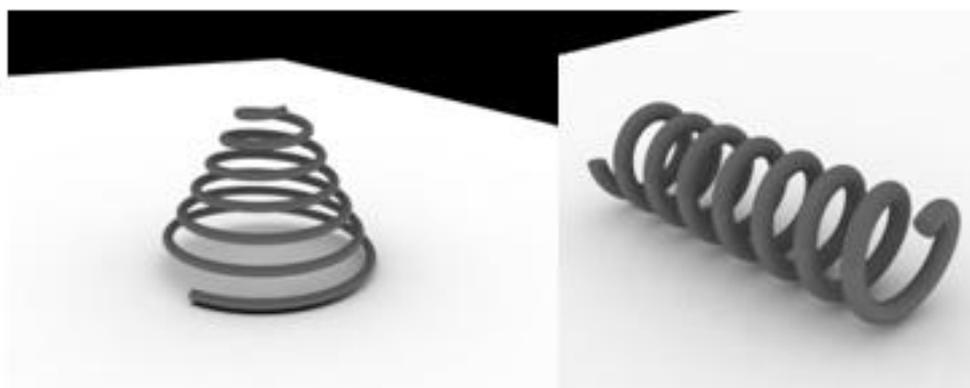


Fig. 26. Resorte helicoidal tridimensional

El cuarto modelo representa un espiral horizontal. En este punto S2 utiliza una estrategia denominada “limiting case analysis”, que consiste en reducir el análisis del problema a un elemento muy particular del mismo, en este caso S2 se concentra solo en un giro del espiral del resorte. Esto lo representa dibujando una flecha en dirección hacia abajo, como se aprecia en la Fig. 27.

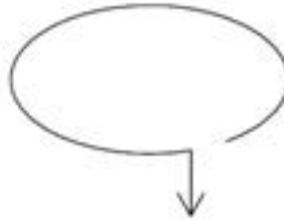


Fig. 27. Modelo 4. Giro de resorte.

El quinto y último modelo (Fig. 28) consiste en una representación poligonal, donde se pretende conciliar el modelo uno y cuatro. En este modelo se integran los dos últimos constreñimientos: la uniformidad del estiramiento del resorte y el plano horizontal del espiral. Este modelo representa un resorte hecho de una suerte de rollo poligonal, donde la barra del resorte está compuesta por diversos elementos segmentados. S2 representa a través de este modelo el reconocimiento de que existe a lo largo del resorte una transmisión de fuerza entre cada segmento. La forma poligonal le permite ilustrar esto más detalladamente, bajo el supuesto, de la geometría, de que un polígono de asemeja a un círculo en el límite (es decir mientras estén más segmentados los lados del polígono más cerca estarán de asemejarse a un círculo)

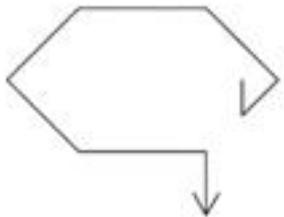


Fig. 28. Modelo de resorte poligonal.

Este último modelo permite a S2 tener el insight necesario para dar respuesta a su pregunta: la tensión del alambre particular del resorte viene dada por un giro o torcedura en los segmentos del resorte. Finalmente S2 genera a partir de su propio razonamiento, siguiendo una secuencia de elaboraciones modélicas analógicas y de simulación, la noción de *torsión* que es crucial para comprender el funcionamiento y estructura de un resorte.

Un asunto destacable del proceso de razonamiento de S2 es que las analogías no son formuladas como elementos independientes en una cadena de razonamiento, sino que es un proceso cíclico que considera la formulación de un modelo, su evaluación, revisión y modificación, el descubrimiento y la incorporación de constreñimientos. También en este contexto surge la noción de analogías “puente” (Nersessian, 2008) lo que significa que una nueva analogía puede servir puente hacia otras, permitiendo una representación más exacta del fenómeno. En el caso de S2 este proceso de formulación, evaluación y

modificación de analogías se sustenta, principalmente, en la simulación que el sujeto es capaz de hacer sobre el comportamiento del objeto teniendo como base lo propuesto por su primera analogía entre un resorte y una barra de alambre.

Una de las conclusiones que se puede extraer a partir del análisis del caso de S2 es cómo la experticia en un dominio, que en el caso de S2 no es la física, sino la topología, es de utilidad para razonar en otro campo siguiendo procesos analógicos. Los conocimientos en topología de S2, siguiendo la hipótesis de Nersessian, determinaron la clase de modelos que generó y las transformaciones sobre los mismos que lo condujeron a la solución del problema planteado. Esto pone sobre relieve el rol que tienen nuestros conocimientos previos en la clase de representaciones que hacemos de los problemas o las situaciones.

Algo destacable del proceso de razonamiento de S2 es que se logra generar un modelo de un mecanismo oculto, inaccesible a la observación directa. Para comprender cómo opera un resorte se lleva a cabo una serie de pasos de inferencia que no siguen un esquema tradicional de razonamiento proposicional, sino que están posibilitados por las representaciones analógicas generadas, las simulaciones mentales hechas a partir de éstas y diagramas. Específicamente, el punto crítico del razonamiento de S2 ocurre cuando éste pasa de comprender el estiramiento del resorte por el doblez o la flexibilidad del alambre a formular la noción de torsión. Fue solo a través de la generación de esta idea que pudo explicar razonablemente la respuesta correcta a su problema.

El caso de S2 permite que seamos testigos de un proceso de RBM donde se destaca: 1) detección y aplicación de constreñimientos para la representación inicial de un problema, 2) la evaluación y modificación constante de las representaciones hasta que se logre dar con una que satisfaga dichos constreñimientos, 3) la inferencia de nuevos constreñimientos a partir de las reformulaciones del modelo inicial que da lugar a una comprensión más profunda del problema u otorga nuevas perspectivas.

Estas conclusiones son de gran relevancia para el enfoque de EABM. Asimismo, la práctica de modelado realizada por S2 da cuenta de la importancia que tienen las representaciones visuales, diagramáticas, kinésicas, la simulación perceptual y motora en el proceso de razonar y generar una idea novedosa.

2.3. Enseñanza y Aprendizaje Basado en Modelos: análisis de una propuesta instruccional.

La propuesta instruccional que se analizará en esta sección (Clement, 2009) se plantea como una nueva perspectiva sobre el desarrollo de procesos de enseñanza y aprendizaje de las ciencias. Toma como punto de partida las teorías de la psicología cognitiva tradicional y el aprendizaje social, incorporando elementos de las teorías epistemológicas sobre el cambio conceptual más tradicionales, pero su base principal está constituida por la teoría del RBM y los Modelos Mentales. Tiene una raíz en la teoría piagetiana sobre el aprendizaje, en cuanto esta implica una reacomodación de la estructura cognitiva del sujeto, y en la vygotskiana, porque se considera la interacción social como parte constitutiva del desarrollo del RBM en la educación. Como se observará el eje de la EABM está en la interacción profesor-alumno y entre alumnos para el desarrollo de procesos de razonamiento en actividades de investigación colaborativa, usando prácticas de RBM.

Según el diagnóstico realizado por quienes sostienen este planteamiento de RBM orientado a la educación en ciencias, las teorías antecesoras a las del cambio conceptual vinculado a las prácticas de modelado presentan limitaciones para lograr desentrañar los procesos cognitivos que ocurren en cada paso del aprendizaje de un determinado contenido. Esto tiene como resultado que la implementación de dichas teorías en la práctica se desarrolla de manera intuitiva por los docentes, no existiendo un cuerpo de conocimientos que explícitamente sirva como guía para el desarrollo de actividades pedagógicas (Rea-Ramírez, Clement, Núñez-Oviedo, 2008). El enfoque de EABM se plantea una complementariedad en el uso de métodos socio-cognitivos para conducir a los estudiantes a la elaboración de sus propios modelos científicos, partiendo desde sus preconcepciones, conduciéndolos por una ruta de aprendizaje hacia la producción de modelos más cercanos a los modelos conceptuales científicos.

Los autores de esta propuesta destacan como los principales referentes sobre el estudio del cambio conceptual a Piaget y Kuhn (Rea-Ramírez, Clement, Núñez-Oviedo, 2008). En el caso de Piaget el cambio se produce a partir de la búsqueda del acomodo de las estructuras conceptuales producto de la insatisfacción o desequilibrio generado por una concepción inicial que se muestra como errónea. Desde la obra de Kuhn, el cambio conceptual se explica en el contexto de las revoluciones científicas, como consecuencia de la constatación de anomalías en un paradigma explicativo. Ambos teóricos analizan desde ópticas diversas el cambio conceptual. Lo que propone Clement y su grupo de investigación, siguiendo así la línea defendida por Nersessian, es complementar estos enfoques con el RBM, es decir, lograr una aproximación al cambio conceptual en el aprendizaje que tenga en cuenta tanto los factores cognitivos individuales como aquellos contextuales, sociales y culturales que influyen en la generación de ideas.

Preparar y dirigir actividades de enseñanza y aprendizaje que busquen el cambio conceptual involucra que los estudiantes revisen sus creencias sobre la cosas, acomodando una colección de conceptos hacia una perspectiva que se muestre como más pertinente según lo que se desea enseñar. El conocimiento plasmado en un modelo mental refleja una estructura conceptual organizada. El cambio conceptual en educación debe apuntar, entonces, a movilizar, enriquecer y producir innovaciones en dichas estructuras conceptuales. Es por esto que en un primer paso se hace necesario detectar cuáles son las preconcepciones de los estudiantes que eventualmente podrían resistirse al cambio. Esto se puede observar en la mantención de concepciones alternativas, concepciones erróneas o ingenuas, aun cuando se haya mostrado que son insuficientes. El desafío que se plantea la EABM es cómo conducir y lograr este proceso de modificación de las estructuras conceptuales en los estudiantes, produciendo experiencias de aprendizaje que permitan, primeramente, generar un conflicto con las concepciones erróneas o incompletas, detectando inconsistencias y anomalías, que sean impulsoras del cambio conceptual.

Como ya se indicó en el primer capítulo de este trabajo, el RBM consiste en una forma de comprender la innovación conceptual en ciencias focalizándose en el estudio de los procesos que conducen a dicha innovación. Esta forma de entender el razonamiento finalmente arroja bastante luz sobre cuál es el camino que debe seguir una secuencia de EABM. Como se evidenció anteriormente con la presentación del caso S2, es posible identificar una línea de razonamiento característica de una práctica de RBM, identificando una serie de estrategias que son parte del proceso. El concepto de “ruta de aprendizaje” [learning pathway] apela precisamente a esto. En otras palabras, programar una secuencia de actividades enmarcadas en un modelo de enseñanza coherente con el

RBM consistente en trazar el camino más o menos preciso que conducirá a la modificación o generación de estructuras conceptuales en los estudiantes.

A lo largo de sus investigaciones, John Clement y sus colaboradores han detectado y propuesto un conjunto de estrategias y modos de enseñanza que forman parte del proceso de RBM. A continuación se presenta una revisión de estos, con la finalidad de ir aclarando cuáles serán los componentes de una ruta de aprendizaje desde la perspectiva de EABM.

2.3.1. Modos de EABM en la co-construcción de modelos.

La *co-construcción* es la denominación que recibe el proceso más general en el cuál los profesores guían a los alumnos a enriquecer sus modelos expresados sobre los fenómenos que investigan, que en su mayoría son erróneos, incompletos o insuficientes comparados con los modelos conceptuales científicos. La co-construcción es un proceso de andamiaje en el cuál el docente presenta modelos físicos, visuales o se incita la elaboración representaciones mentales a través del discurso, con el fin de lograr en los alumnos el desarrollo representaciones modélicas, la evaluación y modificación de las mismas. Es un proceso de continua retroalimentación entre profesor y alumno, donde este último presenta como feedback a la guía del profesor modelos expresados que varían cualitativamente durante el proceso de razonamiento. El nombre destaca que este proceso es colaborativo. La co-construcción engloba un complejo de estrategias y procedimientos en base a modelos generados por los estudiantes y también aquellos que son introducidos por el profesor. El rol de los estudiantes es activo a lo largo de un constante proceso de investigación. El objetivo de utilizar esta práctica es animar a los estudiantes a construir relaciones significativas y representarlas apropiadamente, a través de la guía o motivación hecha por el profesor. El rol del docente se caracteriza por la introducción paulatina de explicaciones o información que potencie el proceso de construcción de los alumnos, buscando que ellos sean capaces de inferir las propiedades del fenómeno que deben ser incluidas en el modelo. Más precisamente la co-construcción es entendida como una interacción dialéctica que involucra la formulación de modelos parciales, críticas y revisiones dirigidas hacia el cambio conceptual (Clement. 2008).

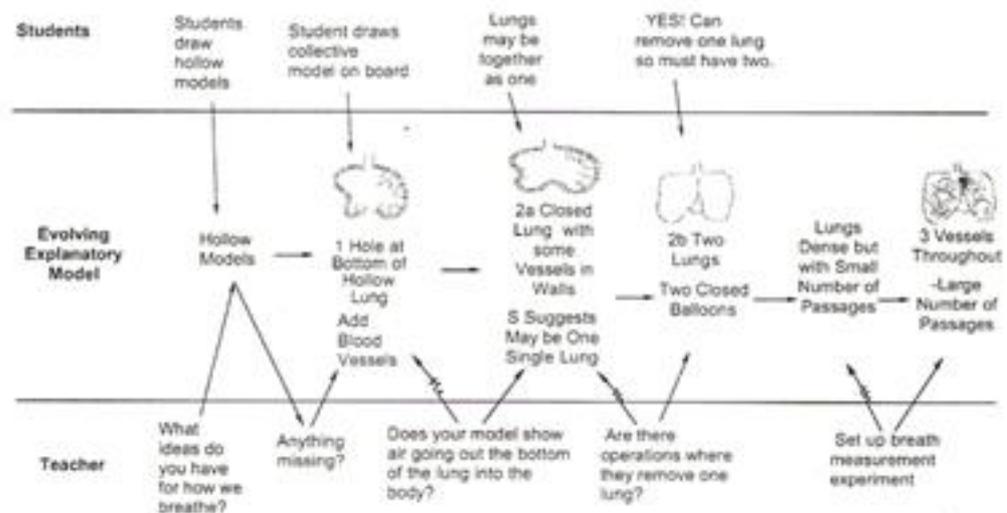


Fig. 29. Co-construcción en torno al sistema pulmonar (Clement, 2008, p. 14)

En la figura 29 se presenta un diagrama por medio del cual Clement evidencia el camino seguido por una elaboración modélica bajo el análisis de *preguntas discrepantes*, con el objetivo de producir *disonancia productiva*. El proceso comienza con una primera elaboración modélica, y luego continúa con su evolución generada por el examen entre profesor y estudiantes. En la figura, sobre la línea superior se indican las intervenciones de los estudiantes, mientras que bajo la línea inferior se consignan las preguntas realizadas por el docente, hechas con el propósito que los estudiantes examinen y reformulen sus representaciones modélicas. Al centro de la figura se muestra el progreso, de izquierda a derecha, desde una representación de un solo pulmón hueco a un modelo de dos pulmones con vasos sanguíneos en su interior.

Principalmente esta propuesta de co-construcción de modelos se lleva a cabo como un proceso que incluye un conjunto de prácticas de aprendizaje específicas, denominadas “modos”. Los modos de co-construcción son estrategias de enseñanza y aprendizaje aplicadas en conjunto con una intención particular en el proceso de generar, evaluar o modificar una construcción modélica. Clement identifica principalmente tres modos: *modo de competición*, *modo de confirmación*, *modo de refutación* y *modo de adición*.

El objetivo del *modo de competición* es la generación de *disonancia productiva* en grupos de discusión. Se entiende por disonancia la toma de conciencia de ideas o creencias que se encuentran en conflicto frente al entendimiento de una determinada situación. En este contexto la disonancia se considera productiva porque tiene el propósito de estimular la discusión y el análisis, y no solamente poner en evidencia un conflicto cognitivo. Desde el punto de vista del profesor el modo de competición consiste en propiciar una situación de trabajo donde se alimente la presentación de ideas contradictorias o dispares e incitar a la confrontación y el examen crítico en busca de la mejor explicación. El modo de competición busca conducir a desechar algún modelo construido en el proceso de razonamiento y reemplazarlo por otro. Se fomenta la presentación de comparaciones y la elección de un modelo dejando otros fuera de la discusión. La disonancia generada durante el modo de competición también promueve el proceso de evaluación de un modelo. Algunas estrategias aplicables en el modo de competición son: la presentación de preguntas discrepantes (como se ejemplifica en la figura 29) la realización de experimentos mentales y mostrar las conclusiones inadecuadas que se seguirían de la aceptación de un modelo frente a otro.

Una de las claves para la ejecución exitosa del modo de competición es la pericia que pueda tener el docente para identificar y trabajar sobre la base de ideas contradictorias y generar *disonancia productiva* en base a eso, como una manera de superar el conflicto de ideas e incentivar el razonamiento de los estudiantes. Se utiliza el modo de competición cuando se insta a los estudiantes a expresar sus ideas que compiten como explicaciones viables a un problema, para que las comparen y elijan. Parte importante de este modo consiste, entonces, en hacer a los estudiantes conscientes de que tienen ideas en conflicto en relación a un tópico y mostrar que esa es la mejor oportunidad para hacer comparaciones y sacar conclusiones por ellos mismos.

Un ejemplo interesante del modo de competición (Núñez-Oviedo, Clement, 2008) se produce cuando estudiantes elaboran representaciones distintas de la estructura de la garganta. En el primer caso (Fig. 30), el dibujo muestra que el conducto que va desde la nariz hacia los pulmones y de la boca hacia los pulmones es el mismo. En el segundo caso (Fig. 31), se presentan vías diferenciadas desde la nariz hacia los pulmones y de la boca hacia el estómago. En el contexto del modo de competición el paso a seguir es hacer evidente las discrepancias entre ambos modelos, las consecuencias a las que conduce la aceptación de cada uno y evaluar, finalmente, cuál es el correcto, o qué nuevos

conocimientos o constreñimientos es necesario tener en cuenta. Una vía sería planteando preguntas discrepantes. En el caso del primer modelo una pregunta a formular podría ser: ¿cómo es posible entonces que, al comer, la comida no se vaya a los pulmones?; en el caso del segundo: si el conducto de la boca solo conduce al estómago, ¿cómo es posible que también podamos respirar por la boca? Se puede ver claramente que en este caso confrontar los dos modelos implica reconocer que cada uno tiene elementos correctos e incorrectos. Luego de este episodio de disonancia el paso siguiente es la elaboración de un nuevo modelo, o reformulación del anterior, que incorpore la información reconocida, o dicho en otros términos, se ajuste a los nuevos constreñimientos descubiertos.

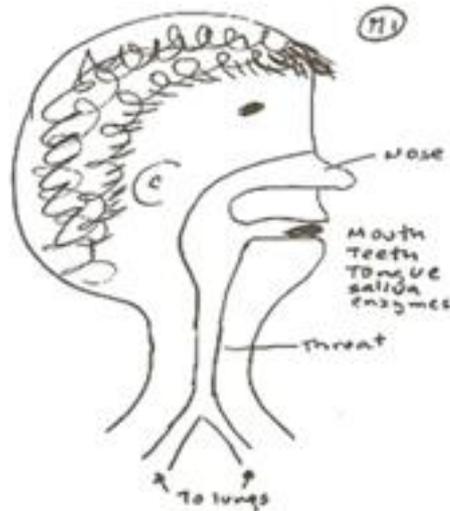
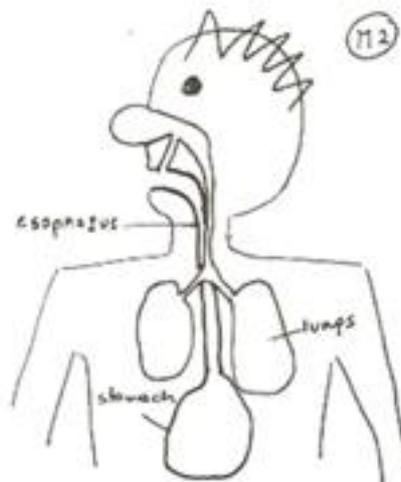


Fig. 30. Modelo 1 de las vías de respiración (Núñez-Oviedo. Clement, 2008, p. 130).



El *modo de confirmación* tiene por objetivo aportar evidencia para dar sustento a una idea que permita interpretar o explicar mejor un fenómeno. Está orientado a la reafirmación de un modelo, o algunas de sus partes clave. En otras palabras, en virtud de este modo se configura una situación de aprendizaje donde se busca información que fortalezca una determinada representación. El modo de confirmación puede ser útil tanto para aceptar

un modelo o rechazarlo (en caso de no encontrar información que lo avale), tanto en su constitución en general o en sus partes.

El *modo de refutación* es la cara opuesta. En este caso la intención está puesta en encontrar información que contradiga lo propuesto por un modelo o sus partes constituyentes. De no encontrar esto, el modelo continuará siendo aceptado provisionalmente. Pero si se halla información que lo contradiga se incitará a descartarlo o a la reformulación de sus elementos problemáticos.

Por último, el *modo de adición* se refiere al conjunto de estrategias que conduce a la incorporación de nuevos elementos en las representaciones modélicas. Tal como lo define Nuñez-Oviedo (Nuñez-Oviedo, Clement, 2008) la secuencia del modo de adición parte desde una interrogante formulada por el docente, seguida de la respuesta del estudiante, y, en caso de que la respuesta se ajuste al modelo o parte del modelo que se busca introducir, el profesor manifiesta su conformidad con la respuesta. En caso contrario, sigue preguntado. El modo de adición trabaja con preguntas sencillas directivas para encauzar la discusión hacia cierto punto determinado previamente por el docente que permita avanzar en la comprensión de un modelo. Su finalidad es incorporar pequeñas ideas o modificaciones a un modelo. Es un proceso sencillo en su definición, que incluso podría acusarse de recurrir a técnicas de condicionamiento, ya que depende del feedback aprobatorio del docente. Tomando el ejemplo anterior (figuras 30 y 31), una forma de aplicar el modo de adición es consultar a los estudiantes sobre situaciones conocidas por ellos que se relacionen con el comer y respirar, por ejemplo ¿Es posible respirar y comer al mismo tiempo?

Estos modos de co-construcción configuran el camino que sigue la ruta de aprendizaje desde una óptica de EABM. Los modos se conciben como prácticas que involucran una actividad permanente del alumno, pero asimismo comprometen la labor docente con un esquema didáctico dinámico, y cognitivamente exigente. Como los mismos autores de esta propuesta resaltan es el punto medio entre los modelos de enseñanza que se centran solo en la práctica constructiva del alumno - como el aprendizaje por descubrimiento, por ejemplo - con la clase que no considera para su desarrollo la contribución del estudiante y es dirigida unilateralmente por el docente.

2.3.2. Estrategias didácticas presentes en EABM

Se han diferenciado *modos de estrategias* con el propósito de mostrar que un modo se caracteriza por un conjunto de estrategias utilizadas con una determinada intención de aprendizaje respecto de la generación de un modelo: evaluarlo, confirmarlo, refutarlo, complementarlo. Las estrategias están directamente involucradas, pero es necesario diferenciarlas, ya que pueden formar parte de los tres modos antes descritos. Entiendo como *estrategia didáctica* cualquier actividad de enseñanza-aprendizaje de mediano o corto plazo que tenga un fin pedagógico. Me referiré a cuatro: la *inspección*, las *actividades de predicción*, los *eventos y preguntas discrepantes* y, por último, la considerada más importante, las *analogías*.

La *inspección* se refiere a la indagación de los conocimientos previos de los estudiantes para determinar cuáles son sus representaciones de base al momento de razonar sobre una situación. Este proceso se desarrolla a través de preguntas abiertas, que buscan que el estudiante se exponga la información que maneja sobre el tema y de esta manera descubrir cuáles son las relaciones conceptuales que puede establecer y el nivel de comprensión que tiene sobre las mismas. La inspección se realiza formulando un problema. La tarea del

docente consiste, por una parte, en presentar los problemas y cuestionamientos adecuados, y, por otra, en prestar atención a la información que utilizan los estudiantes para resolverlos y la forma en que conducen su razonar. Las respuestas de los estudiantes no sólo se presentan de forma oral sino que se incita a la inspección solicitando representaciones de imaginaria (diagramas, simulaciones, por ejemplo) sobre el tópico a tratar. La inspección cumple el propósito que lo alumnos expresen sus representaciones sobre un problema.

Las *actividades de predicción* se realizan sobre la base de los modelos elaborados en las primeras etapas del proceso de EABM, para responder a interrogantes presentadas en una situación experimental real o a través de un experimento mental. Una estrategia de predicción insta a los estudiantes a extraer conclusiones en caso de considerar correcto el modelo propuesto. El objetivo es vislumbrar los aportes y las limitaciones que tiene un determinado modelo expresado para explicar un fenómeno. Es una estrategia donde se evalúa el poder explicativo que posee el modelo mental y/o expresado. La labor del docente es propiciar las condiciones para que los estudiantes pongan a prueba sus modelos y averigüen en primera persona si lo que han propuesto es correcto o no en relación al modelo conceptual que es objetivo del aprendizaje. Esta estrategia puede ser parte de los modos de confirmación y refutación.

Sobre las *analogías* ya se ha señalado anteriormente su rol en el RBM (ver capítulo 1, sección 1.4.2), pero no específicamente como formarían parte de un proceso de enseñanza y aprendizaje. En la educación en ciencias el uso de analogías se ve justificado por su valor para hacer accesibles aquellos contenidos que están lejanos a la experiencia cotidiana de los estudiantes, por medio de la alusión a experiencias familiares o conocimientos previos. Las analogías son útiles, además, para hacer aprehensibles fenómenos que escapan de la posibilidad de ser experimentados directamente. Pedagógicamente, tienen por objetivo hacer comprensible una información nueva a través de la ya conocida o de más fácil acceso.

En el ámbito de la educación, dicha importancia ha sido destacada en el programa de Filosofía para Niños creado por Mathew Lipman. Las actividades pedagógicas que involucran el uso de analogías están presentes específicamente en el programa *Pixy*, que en nuestro país se aplica en los niveles de 3er y 4to año de enseñanza básica (Lipman, Sharp, 1989) Su objetivo es educar en el uso riguroso y crítico del lenguaje. Desde mi propia experiencia como docente en talleres donde se utiliza este programa, he podido constatar la positiva contribución que tienen los ejercicios de analogías en la capacidad de establecer relaciones entre lo aprendido en diferentes asignaturas y cómo, además, potencian la mantención de la actitud inquisitiva propia de los niños pequeños, motivando la elaboración de comparaciones creativas.

Las analogías han sido estudiadas como parte constituyente del proceso natural del razonamiento, tanto en razonadores comunes como aquellos que son especialistas en alguna disciplina científica. Este es un punto desarrollado anteriormente, en la sección 1.4.2. del primer capítulo. Como estrategia didáctica su contribución está en servir como base preliminar para el razonamiento al potenciar la generación de modelos, aunque sean híbridos o imperfectos en relación al modelo conceptual que el docente se propone enseñar. También es valiosa su utilización con la finalidad de modificar un modelo, arrojando luz sobre los elementos que deben ser considerados como relevantes y sobre aquellos que deben ser desechados. Recordemos el caso de S2 donde la evolución de las representaciones sobre el problema del resorte es un proceso de RBM desarrollado a través de analogías. Es posible que todo el proceso de EABM realizado en una clase o una unidad de trabajo sea conforme a la presentación secuencial de variadas analogías que permitan un acercamiento escalonado hacia el modelo conceptual científico. También hay que tener en cuenta que

incluso ciertos modelos conceptuales se sustentan en analogías, como la analogía del átomo con el sistema solar en el modelo de Bohr.

Las analogías, como se vio en la primera parte de este trabajo, constituyen una de las herramientas principales para la generación de modelos. En educación cobran la misma importancia. En relación a esto, los estudios realizados por Clement y sus colaboradores han permitido concluir que hay ciertos criterios importantes de considerar sobre el uso de las analogías en las prácticas educativas. Una analogía debe ser ante todo aplicada en su justa medida, es decir, teniendo claramente acotado el territorio que corresponde al mapeo sobre el asunto que se pretende conocer. Esto cumple con el propósito de evitar el defecto de un “sobremapeo”, es decir, llevar la analogía más allá de sus límites de significación con sentido, o, por el contrario, conducir a una simplificación excesiva del fenómeno que se estudia. Por ejemplo, cuando se busca explicar a los alumnos en una clase de biología que la forma como se disponen las células superficialmente se asemeja a como los granos de maíz están ordenados en la mazorca, se corre el riesgo de sobreinterpretar esta analogía añadiendo la idea de que éstas deben estar sostenidas por un soporte, o que, por contrapartida, simplifiquen excesivamente su comprensión sobre la estructura interna y funcional de la célula.

Por lo tanto, es necesario que el uso de analogías sea planificado previamente, para que el docente pueda predecir las posibles malinterpretaciones, las transferencias inadecuadas o equivocadas desde la base o domino fuente de la analogía hacia el fenómeno a comprender. Además, se recomienda que el profesor explicita que utilizará una analogía para explicar algún contenido y el propósito específico con que la menciona, es decir, qué asunto en particular pretende ilustrar a través de ésta. También se recomienda que los estudiantes inviertan una cierta cantidad de tiempo en familiarizarse con las partes componentes de la analogía, con el objetivo que el docente asegure que esta sea interpretada de forma adecuada (Else, Clement, Rea-Ramírez, 2008). El uso de una analogía en ciertos casos se enriquece con el apoyo de diagramas (dibujos y tablas explicativas, por ejemplo). Este apoyo complementario también se debe incluir en la preparación para introducir una analogía.

Sobre el grado de complejidad que deben o no tener las analogías no existe un claro acuerdo. Más bien depende del conocimiento y complejidad del tema a tratar desde la perspectiva del estudiante, lo que determina cuál será la mejor analogía en cada caso. A modo de orientación, dependiendo de aquellos elementos que se quieran destacar a través del uso de una analogía, se propone la siguiente tipología (Else, Clement, Rea-Ramírez, 2008):

Analogías cercanas v/s lejanas. Las primeras son aquellas donde la base (o dominio fuente) y el target de la analogía comparten un sinnúmero de características, aunque sea de modo superficial. Las segundas consisten en comparaciones donde hay pocas semejanzas, pero estas son altamente significativas.

Analogías familiares v/s no-familiares. Las primeras aluden a comparaciones vinculadas con la experiencia directa de los alumnos y no requieren de mayor aclaración previa a su presentación. En cambio, las no-familiares son aquellas que si bien pueden resultar muy iluminadoras, necesitan que sus componentes sean explicados para conseguir claridad sobre su significado y posibilidades de aplicación.

Analogías visuales-estructurales v/s funcionales. Según el tipo de información que se busca ilustrar a través de la analogía se plantea esta diferenciación, Permite clarificar el propósito que tiene la analogía en relación a las cualidades que pretende evidenciar de

un fenómeno. Una analogía visual-estructural se concentra especialmente en aspectos de disposición espacial, mientras que en una funcional en comportamientos y su finalidad.

Analogías simples v/s complejas. Las analogías pueden variar en su complejidad según la formación previa que tengan los alumnos. Una analogía simple puede contribuir a destacar aspectos salientes de un fenómeno, en este sentido una analogía simple es de utilidad para comprender aspectos específicos para ser incorporados en un modelo. El uso de una analogía compleja requiere contar con razonadores capaces de comprenderla, pero su valor puede ser mayor en la medida que puede propiciar comprensiones más profundas de un fenómeno y conducir a la elaboración de modelos más ricos en información.

A continuación presento una adaptación traducida de una tabla con ejemplos de analogías clasificadas teniendo en cuenta los criterios antes expuestos. Aparece una descripción sobre los elementos específicos que se busca mapear en cada caso.

Fig. 32. Ejemplos de analogías usadas en el currículum “Energía en el Cuerpo Humano”

Analogía	Elementos mapeados	Complejidad	Propósito/función
Mazorca de maíz	La disposición de los granos es como el arreglo de las células del cuerpo, ya que ambas están dispuestas en un patrón con poco espacio en el medio.	Simple	Visual/geométrica
Analogía de la escuela	Las escuelas tienen partes que tienen funciones diferentes, al igual que las células tienen partes que funcionan de manera diferente, y las funciones de algunas partes de la escuela son similares a las funciones de algunas partes de la célula.	Compleja	Funcional
Analogía del fuego	Un incendio consume oxígeno y combustible y produce dióxido de carbono, agua y energía, así como una mitocondria obtiene energía de la glucosa en el uso de oxígeno, con los mismos productos de desecho.	Compleja	Funcional
Analogía del delta de un río	Un río se ramifica en muchas pequeñas ramas en su camino hacia el mar, tal como los vasos sanguíneos se ramifican en pequeños vasos después de salir del corazón.	Simple	Visual/geométrica
Analogía de las cañerías de agua	La ramificación de las tuberías de agua en una ciudad que lleva agua a las casas es como la sangre llega a las células a través de los vasos.	Simple	Funcional y visual/geométrica
Analogía de la uva	La disposición de las uvas y sus tallos es similar a la disposición de los alvéolos y bronquios en los pulmones	Simple	Visual/geométrica

(Else, Clement, Rea-Ramírez, 2008, p. 219-220)

Un punto sobre el cual hacen hincapié quienes proponen el uso de analogías como una estrategia de enseñanza es la importancia de formar a los estudiantes para aplicarlas y formularlas correctamente. La habilidad para razonar por medio de analogías es una capacidad que se desarrolla con el tiempo, requiere de la habilidad para razonar con fuentes de información de diversa índole. Por esta misma razón, se ha propuesto que la utilización de las analogías se reserve para aquellos casos particulares donde no existe la posibilidad de experimentar directamente o donde los conceptos a enseñar son demasiado abstractos. Es decir, las analogías son una estrategia que en el proceso de EABM es útil para tratar aquellas áreas donde los estudiantes no pueden construir modelos por sí mismos a partir

de la experiencia cotidiana o investigación experimental, pero llegado a cierto nivel de complejidad hay que tener una preparación para utilizarlas provechosamente.

Otras estrategias que forman parte de la EABM son las *simulaciones mentales*, la elaboración de *diagramas* y los *experimentos mentales*. No me he querido detener en estos puntos porque el rol de estas estrategias en el RBM fue ya abordado en el primer capítulo de esta tesis (sección 1.4.3). No obstante, creo necesario mencionar que la inclusión explícita de estas herramientas para el razonamiento perfila desafíos para la enseñanza. En otras palabras, si bien, su utilización se vislumbra como un innegable aporte para el enriquecimiento del aprendizaje de los estudiantes, hay que considerar que la correcta utilización de estas estrategias implica un aprendizaje en si mismo. Una propuesta instruccional que considere tanto el modo de co-construcción y las estrategias de enseñanza y aprendizaje mencionadas debe por lo tanto además considerar una preparación cognitiva integral en el uso de dichas herramientas.

2.3.3. Organización curricular por niveles y ciclos de enseñanza.

La modelo curricular que aquí se expone sitúa en un marco más general las estrategias y modos de EABM ya descritos. En las secciones anteriores se expusieron las estrategias didácticas y los modos de aprendizaje característicos que conforman la ruta de aprendizaje del enfoque de EABM. Ahora se expondrá la manera como se articulan en una propuesta curricular específica. John Clement junto a otros investigadores (Clement, 2008b) en el área del RBM aplicado a la educación han constatado por medio de sus estudios que existen suficientes semejanzas entre las secuencias de EABM en las tres áreas principales de enseñanza de las ciencias en el currículo escolar – física, química y biología – como para sostener un modelo curricular basado en modelos que sea aplicable en los diversos niveles de enseñanza. El objetivo de esta propuesta curricular es fomentar el desarrollo de modelos mentales flexibles en los estudiantes y que éstos sean considerados como pieza clave de su comprensión del conocimiento científico.

Dentro de este currículo se identifica la co-construcción como una forma transversal de enseñanza y aprendizaje. El propósito es conducir un proceso de evolución de los modelos expresados por los alumnos hacia los modelos científicos a través de la co-construcción. La implementación de un currículo con estas características implica, según Clement, diferenciar entre cuáles son las metas a conseguir en cada momento del currículo, cómo estas se encuentran estructuradas según determinados contenidos y secuencias, y las estrategias de enseñanza pertinentes en cada instancia para conducir a los estudiantes a la consecución de las metas curriculares.

El currículo de EABM es un plan intencionado que comienza con la constatación de las preconcepciones de los estudiantes, para distinguir las que son apropiadas de las que son inútiles o erróneas respecto de las metas de aprendizaje. Esto define el inicio de la ruta de aprendizaje. Clement sugiere que pensemos este currículo como una cadena que comienza con concepciones comunes, inapropiadas y otras medianamente pertinentes, para luego avanzar progresivamente hasta llegar al modelo final, meta del aprendizaje. En el camino, esta ruta de aprendizaje está conformada por modelos intermedios, híbridos, que contienen elementos del modelo final o aproximaciones parciales. Es una secuencia que no se establece según un orden lógico necesario, sino en virtud de una secuencia de desarrollo flexible. Lo anterior significa que los contenidos no se organizan en virtud de un determinado orden de los enunciados que componen una teoría científica (desde los que son premisas hacia sus conclusiones, por ejemplo), sino que teniendo en cuenta los

elementos que conforman los modelos científicos a enseñar en relación con los modelos mentales expresados que tienen los alumnos. Desde allí se teje una red conceptual orientada hacia los objetivos de aprendizaje. Es una red secuenciada que se articula flexiblemente conforme a los modelos parciales o híbridos que sean capaces de formular los estudiantes en cada etapa en interacción con el profesor.

En suma, la ruta de aprendizaje se configura inicialmente según:

- Las preconcepciones
- Los modelos intermedios (parciales o híbridos)
- Los modelos finales, objetivos a alcanzar según el currículo.

La labor del docente en este contexto es guiar a los estudiantes a través de la ruta de aprendizaje hacia un entendimiento conceptual cada vez más profundo. Las prácticas de modelado (estrategias y modos antes descritos) están dirigidas hacia la “evolución de modelos” (Clement, 2008b). Los modelos no son presentados de forma acabada por el docente, sino que se propicia su desarrollo lo más naturalmente posible, desde las concepciones previas de los estudiantes siguiendo el curso de sus avances hasta que el modelo final haya sido comprendido.

Según Clement, las ventajas de proponer la evolución de modelos frente a otras formas de enseñar modelos científicos se pueden resumir en que: 1) compromete a los estudiantes en el proceso de revisión y evaluación de modelos, considerado fundamental para el pensamiento científico; 2) se realiza en pasos que están acordes a los conocimientos de base que tienen los alumnos, produciendo la cantidad adecuada de disonancia de manera controlada en los momentos precisos; y 3) se propicia la comprensión de los fenómenos de la naturaleza a través del descubrimiento de sus constreñimientos intrínsecos.

Clement propone orientar la evolución de modelos según una secuencia de seis niveles de organización curricular. Esta propuesta plantea un currículo dividido en capas, cada una de las cuales alude a diversos momentos de la actividad pedagógica. Así por ejemplo la primera capa la constituye la planificación más general donde se determinan los objetivos y contenidos de enseñanza, mientras que la menor da cuenta del espacio mínimo de tiempo en que un profesor presenta una interrogante a un estudiante. En este currículo las estrategias de EABM se organizan en escala temporal desde los intervalos de tiempo más amplios hasta los más breves.

A continuación expongo las características principales de cada nivel siguiendo el esquema presentado por Clement (Clement, 2008b):

El *nivel 6* es la capa más amplia que dura entre 2 a 6 meses. Corresponde al periodo de tiempo en que se ejecuta un currículo de EABM. Las estrategias que contempla están destinadas a elaborar un currículo integrado, como el diseño de una estructura de objetivos secuenciados y conectados según los modelos que componen una unidad. Incluye la programación de la secuencia de contenidos, cómo estos se estructuran con el fin de generar modelos integrados en las representaciones de los estudiantes, además de la determinación de él o los conceptos que son el objetivo de las actividades de aprendizaje.

El *nivel 5* es la primera subdivisión temporal del nivel anterior. Se extiende desde 3 a 5 días, en los que se desarrolla una unidad de aprendizaje. Está conformado por las estrategias de modelado que se despliegan a lo largo de una unidad temática. Incluye las consideraciones sobre cómo se introducirá un problema, cuáles son las partes del modelo a construir y cómo se aplicará el modelado en esa unidad en particular. Este nivel depende

de la especificación previa en el nivel 6 de cuál es la secuencia de modelos a comprender y toma como punto de partida las preconcepciones de los estudiantes.

El *nivel 4* tiene una duración desde 10 a 80 minutos. Contiene las estrategias conducentes a la modificación modelos en una clase. En este nivel se aplican los diversos modos de co-construcción antes descritos que conducen la evolución de un modelo.

El *nivel 3* tiene una duración breve entre 2 a 15 minutos. Se concentra en el trabajo sobre elementos particulares de un modelo. En éste nivel se promueve la generación de modelos, los procesos de evaluación y modificación. Consta de la de los pasos individuales orientados al cambio conceptual, durante la aplicación de los modos de co-construcción establecidos en el nivel anterior.

El *nivel 2* es de una duración aún menor, de 5 a 100 segundos. Corresponde al periodo en que se utilizan estrategias cognitivas de muy corto plazo. Aplicadas tanto por los estudiantes o el profesor en su contribución en el proceso de co-construcción. Por ejemplo, solicitar una explicación o una predicción, formular o responder una pregunta discrepante, solicitar o introducir una analogía, etc. Contiene las contribuciones de los estudiantes segundo a segundo, además de las improvisaciones del profesor para conducir el proceso de modelado.

Finalmente, el *nivel 1* contiene las prácticas más breves que ocupan de 1 a 20 segundos en su ejecución. Contiene las tácticas dialógicas para mantener activo el proceso de RBM en los estudiantes, para fomentar el intercambio de ideas y el establecimiento de normas sociales para dirigir la discusión en una clase de ciencias.

La idea general de hacer esta clasificación en niveles de escala temporal y desde instancias de planificación curricular hasta el diseño de aplicación, proporciona un panorama bastante distinto sobre como organizar actividades de EABM. Cada nivel puede ser estudiado de forma independiente según las estrategias cognitivas que se ponen en juego en cada momento. Además, pueden ser examinados de manera complementaria con la revisión de las estrategias y modos de co-construcción analizados previamente. Las aportaciones de un enfoque como este cumplen, por lo menos en el papel, con el propósito de abrir un espacio a las prácticas de RBM en educación.

Fig. 33 Metas y estrategias en los seis niveles de organización curricular para EABM

Nivel	Duración	Estructura de metas para el aprendizaje	Estrategias de enseñanza
Nivel 6. Integración curricular.	2 – 6 meses	Estructura de objetivos a través de unidades que integran los sistemas de modelos objetivos.	Secuenciar y establecer conexiones para la integración entre los principales sistemas de modelos de cada unidad.
Nivel 5. Estrategias para unidad de EABM.	3 – 5 días.	Principales modelos objetivos de cada unidad	Introducir problemas. Construir las partes de un modelo. Síntesis y aplicación de un modelo.
Nivel 4. Estrategias para desarrollar clases.	10 – 80 minutos.	Ruta de aprendizaje planificada que conduce al modelo objetivo para lección.	Modos de construcción de modelos a gran escala: Competición, combinación, diferenciación, evolución de modelos, etc.
Nivel 3. Estrategias para un solo elemento del modelo	2 – 15 minutos.	Elemento de un modelo elegido para cambio o confirmación conceptual. Pasos individuales para producir cambio conceptual	Promoción de la generación, evaluación y modificación de los modelos individuales. Modos de construcción aplicados a pequeña escala.
Nivel 2. Estrategias cognitivas individuales para movilizar la discusión	5 – 100 segundos.	Influencia improvisada de ideas entre profesor y estudiante. Razonamiento constructivo, micro contribuciones.	Pequeñas estrategias cognitivas: pedir explicaciones, predicciones, preguntas discrepantes, solicitar o introducir analogías y evaluación de modelos.
Nivel 1. Tácticas dialógicas	1- 20 segundos.	Compartir activamente ideas y normas sociales para la discusión en clase de ciencias	Tácticas dialógicas usadas por el profesor para fomentar las contribuciones de los estudiantes y compartirlas.

(Traducido y adaptado desde: Clement, 2008b, p. 262)

Hay tres puntos que destacaré de esta propuesta. Primeramente, sobre la organización del currículum en seis niveles diferenciados por una escala temporal. Es un hecho bastante singular encontrar un planteamiento como este, que incluso considere las intervenciones que tienen una duración de segundos. Esto desde el punto de vista de la formación en habilidades de RBM es una virtud. Demuestra una clara conciencia de que el proceso de construir representaciones modélicas se conforma de habilidades a gran escala, y de pequeña escala. Como por ejemplo es importante considerar en general la capacidad de confrontar dos modelos y formular uno nuevo que integre los constreñimientos de ambos. Pero es parte fundamental también sugerir una comparación que en pocos segundos

conduzca a generar una analogía. En segundo lugar, se consideran las diversas etapas involucradas en la ejecución de procesos de enseñanza y aprendizaje: momentos de estructuración y planificación de unidades de aprendizaje, hasta su puesta en práctica. En tercer lugar, es destacable la manera como se integran las diversas estrategias cognitivas necesarias tanto desde el punto de vista del estudiante como del profesor. Destaco esto, porque generalmente las planificaciones van enfocadas en lo que se espera que los alumnos realicen y no las habilidades cognitivas que el docente pone en juego en cada momento del proceso de enseñanza.

Examinando esta propuesta desde un punto de vista más crítico, quizá sería necesario desarrollar una terminología más precisa para referirse a cada etapa. La división en 6 niveles por escala de tiempo parece acertada desde cierto punto de vista, pero también confunde cuando se trata de procesos que pueden ocurrir en una duración que escapa a los márgenes de tiempo establecido. Desde esta perspectiva planificar unidades de aprendizaje según los seis niveles podría entorpecer o volver más engorroso el proceso. No obstante, como ya lo indiqué, esta división es altamente valiosa para dimensionar las estrategias necesarias para conducir la construcción de representaciones modélicas.

Clement (2008b) se refiere al proceso de construir modelos como una evolución que pasa por tres etapas: generar, evaluar y modificar un modelo. Para referirse a esto utiliza el concepto de *ciclos GEM*, que significa *generación, evaluación y modificación* de modelos. El proceso de co-construcción en la EABM es entendido como un proceso GEM. Incluso Clement sostiene los ciclos GEM como una teoría sobre como opera el proceso de investigación científica en base a modelos. Destaca la importancia de la revisión y reformulación de modelos como parte del proceso que está en constante evaluación. El siguiente cuadro ejemplifica como los ciclos GEM se pueden llevar a cabo en cada área de la enseñanza de las ciencias.

Fig. 34. Coincidencias entre los tres marcos de educación en ciencias desde la óptica de los ciclos GEM (Clement, 2008b, p. 267)

Fases	Marco de química escolar	Marco de biología en la escuela media.	Marco de electricidad en la escuela secundaria.
G Generar Modelo	El profesor desafía a los estudiantes a realizar predicciones en base a su modelo inicial o desde una tabla de datos o de observaciones.	Detectando las ideas de los estudiantes – a menudo a través de la búsqueda por parte del profesor de explicaciones. Si se presentan muy pocas ideas, el profesor puede introducir una analogía inicial.	El profesor o el manual solicita a los estudiantes hacer predicciones para un circuito (esto los anima a generar un modelo si ellos no tienen uno)
E Evaluar Modelo	Se presentan nuevos datos anómalos a los estudiantes que violan sus predicciones y se les solicita que evalúen su generalización.	Intentos del profesor para generar disonancia: a menudo a través de preguntas discrepantes pero a veces pidiendo a los estudiantes la evaluación de ideas.	Los estudiantes observan el comportamiento del circuito (a menudo un evento discrepante, pero a veces confirmatorio). Los estudiantes son animados a mapear implicaciones a su modelo actual para evaluarlo.
M Modificar Modelo (Contribución de los estudiantes)	Se solicita a los estudiantes modificar su generalización sobre los comportamientos del modelo. Se les pide a los estudiantes explicar los nuevos hallazgos.	Se solicita a los estudiantes modificar (o a veces refutar) su modelo actual.	Si está defectuoso , los estudiantes modifican el modelo en discusión con el fin de explicar las observaciones.
M Modificar Modelo (Contribución del profesor)	El profesor ayuda con las modificaciones cuando es necesario con retroalimentación positiva, pistas, información adicional, o explicaciones.	El profesor ayuda a la modificación donde es necesario con analogías, pistas, imágenes, animaciones, o explicaciones.	El profesor ayuda a la modificación donde es necesario con analogías, pistas, anotaciones, o explicaciones.

La figura anterior exhibe las coincidencias evidenciadas por Clement en el desarrollo de actividades de EABM en las tres áreas de formación curricular en ciencias. Como es posible constatar la *generación* de modelos es la tarea inicial que desarrollan los estudiantes. La generación de modelos es animada por el profesor con la finalidad de detectar los conocimientos previos de los estudiantes. En la fase de *evaluación* un modelo es puesto a prueba recurriendo a la aplicación de estrategias y modos de EABM descritos anteriormente. En esta parte del proceso los estudiantes debiesen descubrir nuevos constreñimientos a considerar sobre el tema examinado.

Los ciclos GEM, la organización curricular en seis niveles y la co-construcción configuran un mapa bastante rico y sugerente para analizar la implementación del RBM en educación. Cada una de estas partes de la propuesta de EABM realizada por Clement y su

grupo de investigación muestra una cara distinta de cómo el proceso de RBM tiene un lugar en la educación. La co-construcción hace referencia al proceso dialógico que constituye el fundamento de la didáctica de las ciencias con uso del RBM, es decir, interacción entre estudiantes y profesor en la formulación y comprensión de modelos haciendo uso de un amplio repertorio de estrategias. Los seis niveles del currículo destacan cómo es posible diferenciar el rol de las estrategias cognitivas que forman parte del proceso de EABM según su extensión temporal y su impacto en la evolución de un modelo.

2.3.4. Análisis de un caso de EABM.

Para concluir este capítulo sobre EABM expondré una situación de enseñanza y aprendizaje donde un grupo de estudiantes de enseñanza media fueron parte de una secuencia de actividades inspirada en la propuesta de John Clement. Esto, con el propósito de ejemplificar algunos de los conceptos mencionados a lo largo de este capítulo y también de extraer algunas conclusiones sobre la aplicación del RBM en educación. Aclaro que el propósito de esta puesta en práctica es ilustrar cómo se puede llevar a cabo una actividad de enseñanza y aprendizaje en torno al RBM. No intento con ello evaluar la efectividad mayor o menor del enfoque de EABM frente a otras estrategias de enseñanza. El foco está puesto en evidenciar que es posible desarrollar situaciones de enseñanza y aprendizaje conforme a éstos procedimientos.

La actividad de EABM que expongo a continuación se desarrolló en un tiempo de 2hr. Participaron ocho alumnas de un colegio particular subvencionado, que cursan tercer año de enseñanza media. En cuanto a sus desempeños como estudiantes, tienen rendimientos dispares y se ofrecieron voluntariamente a participar de la actividad. Ésta se desarrolló en interacción grupal, es decir, frente a la problemática planteada las alumnas condujeron su proceso de razonamiento colaborativamente en un grupo un de discusión, compartiendo ideas expresándolas en voz alta y extrayendo conclusiones por consenso.

El tema de discusión seleccionado es la percepción humana. El objetivo de la actividad consiste en conducir la elaboración de un modelo que explique cómo ocurre la percepción humana. No se espera que logren comprender una determinada teoría, sino que a través del examen e incorporación de ideas y conceptos elaboren una concepción propia que incorpore los constreñimientos que estos les sugieran. Las actividades se planificaron teniendo en consideración los conocimientos previos con los que se esperaba que las alumnas contaran previo a esta actividad, referidos principalmente a los contenidos del subsector de Biología sobre el funcionamiento del sistema nervioso, y de Filosofía y Psicología, sobre el proceso de la percepción.

Al grupo de estudiantes se les plantea específicamente el siguiente problema: “¿Cómo nuestro cerebro logra que nos formemos percepciones de las cosas?” Se les indica explícitamente que deben responder a esta pregunta recurriendo a sus conocimientos obtenidos desde las clases de Biología y de Psicología. Por último, se señala que objetivo de la actividad es que formulen su propia explicación de dicho proceso integrando sus conocimientos, y que ésta debe ser expuesta oralmente y expresada a través de algún esquema o diagrama.

El primer paso es averiguar las preconcepciones a través de la *inspección*. Se insta a las alumnas a que manifiesten qué es lo que saben sobre la percepción humana en base a lo que han aprendido en las asignaturas mencionadas. Lo primero que indican es que

en Biología están viendo “lo del cerebro, para qué sirve, los lóbulos”⁸. Se les pregunta qué es lo que conocen de la percepción y señalan que han “visto” el Sistema Nervioso, las partes del cerebro y sus funciones. Entonces se les consulta cómo creen que ocurre la percepción e indican la siguiente explicación preliminar: “A medida que se va percibiendo se van activando esas partes”. Frente a esta formulación tan vaga se les plantea de inmediato una pregunta para indagar más en sus conocimientos. Se les pregunta “¿Qué partes?”, pero no tienen respuesta. Sobre psicología dicen no haber visto en clases aún el tema de la percepción.

De esta primera parte de la actividad se desprenden dos conclusiones importantes. Primero, se constata que en sus conocimientos sobre el cerebro, una idea dominante es que este se divide en áreas funcionales que se activan según la operación de determinados procesos. Segundo, surge la necesidad de introducir ciertas nociones sobre psicología de la percepción. En particular, introducir los conceptos de sensación y percepción, para integrar a la discusión el rol que tiene la información sensorial en la percepción, ya que su primer modelo centrado en la activación de “lóbulos” no hace referencia a esto.

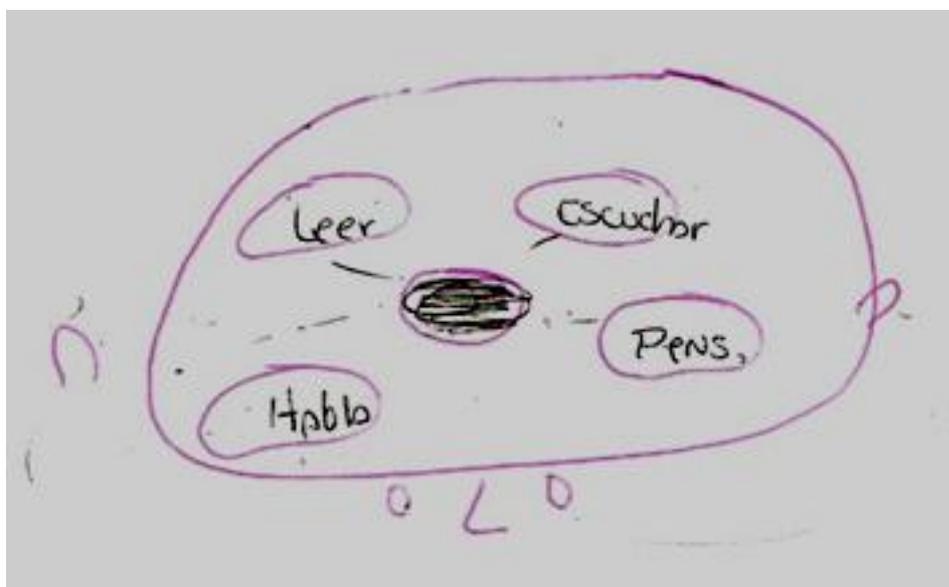


Fig. 35. Modelo inicial de alumnas de tercero medio sobre como ocurre la percepción.

Esta primera representación tiene directa relación con los modelos a los que las alumnas han sido expuestas en sus clases de biología (ver fig. 36, 37 y 38). En el centro de su modelo se representa con un círculo ennegrecido el lugar donde ocurriría la percepción.

⁸ Las citas entre comillas corresponden a comentarios y afirmaciones hechas por las participantes de esta investigación.

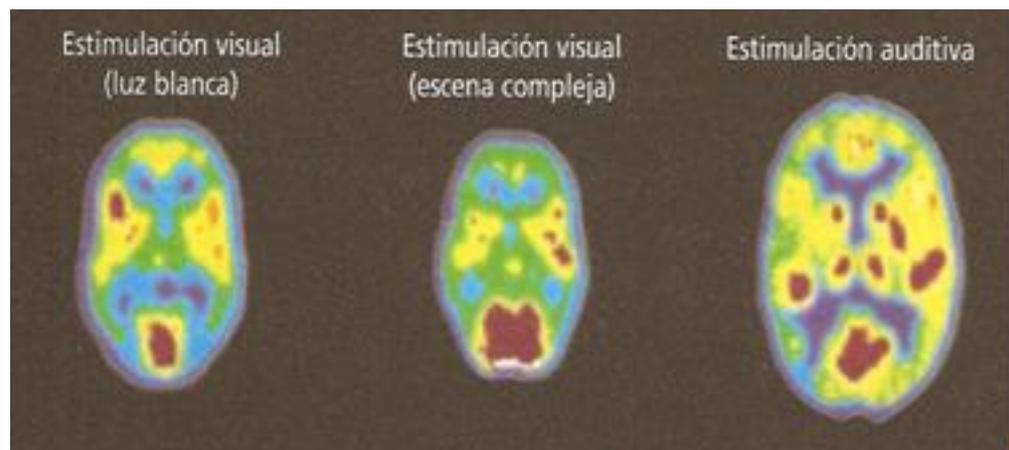


Fig. 36. Vista superior del cerebro activado en frente a diferentes estímulos (Flores, 2009)

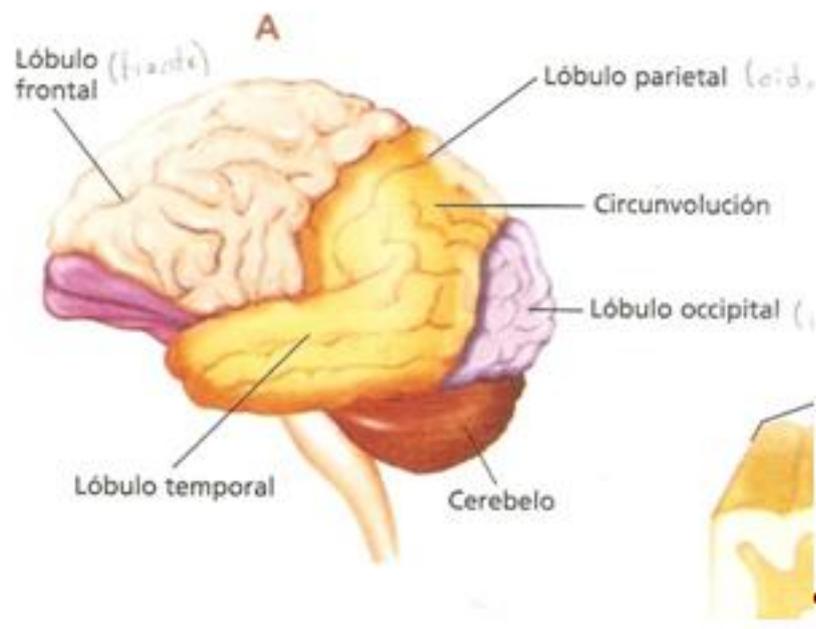


Fig. 37. Partes del cerebro (Flores, 2009)



Fig. 38. Áreas activas durante diferentes tareas asociadas al lenguaje (Flores, 2009)

Las tres figuras anteriores están tomadas del libro de texto de Biología que utilizan las estudiantes que participan en esta actividad. Esta forma de representar cómo funciona el cerebro determina de manera evidente cómo intentan responder la pregunta. La respuesta inicial de las estudiantes es que debe existir alguna área específica para la percepción y que ésta probablemente se encuentra en medio de las áreas destinadas a otros procesos y que “a medida que se va percibiendo se van activando esas partes”.

A continuación, se introduce el examen de los conceptos de sensación y percepción. Se les consulta a las alumnas qué diferencia ven entre ambas nociones. Una de las estudiantes afirma: “Para tener una sensación primero hay que percibir”. A modo de *confirmar* o *refutar* esta afirmación, se les solicita que presenten ejemplos. Una alumna indica: “Al tocar algo caliente, lo que se percibe es el dolor”. Este ejemplo hace notar la poca claridad que tienen sobre el significado de cada concepto y el profesor aclara que las sensaciones son las experiencias que se originan en lo que captamos con nuestros sentidos. Las estudiantes comprenden esta definición.

Teniendo como base lo anterior se pide a las estudiantes que examinen dos objetos: uno fácil de reconocer (una huincha de medir) y otro difícil de identificar (una barra de plástico rígida con forma de arco). Se les solicita que describan las sensaciones que se originan al observar dichos objetos. Indican características como el color, la textura, la forma. Con el propósito de generar *disonancia productiva* se les pregunta qué perciben en cada caso. Sobre el primer objeto, no hay dudas, perciben una “huincha de medir”, pero en el segundo caso comienzan a suponer de qué objeto se podría tratar. Entonces se reformula la pregunta inicial: ¿cómo nos formamos una percepción de los objetos a partir de sensaciones diversas?

La discusión entre las estudiantes deriva hacia el tema de la posibilidad de reconocer un objeto como tal, a pesar de no saber qué es (un niño aunque perciba una huincha de medir, no sabría de qué objeto se trata). Desde esta discusión concluyen que en el caso de la huincha de medir, la percepción se realiza a partir de la memoria, no así las sensaciones: “En la percepción uno recuerda; las sensaciones se basan en los cinco sentidos”, “las percepciones vienen de una base estable, de que la memoria es permanente en ti”. En este punto las estudiantes parecen concordar en que la memoria es el proceso crucial asociado a la percepción, en otras palabras han descubierto un nuevo constreñimiento relevante

para considerar en su explicación sobre la percepción. Esto las lleva a concluir que las percepciones no son fijas, que dependen de los recuerdos de cada individuo. Frente a estas nuevas conclusiones se solicita a las alumnas que elaboren una nueva explicación sobre el proceso de la percepción.

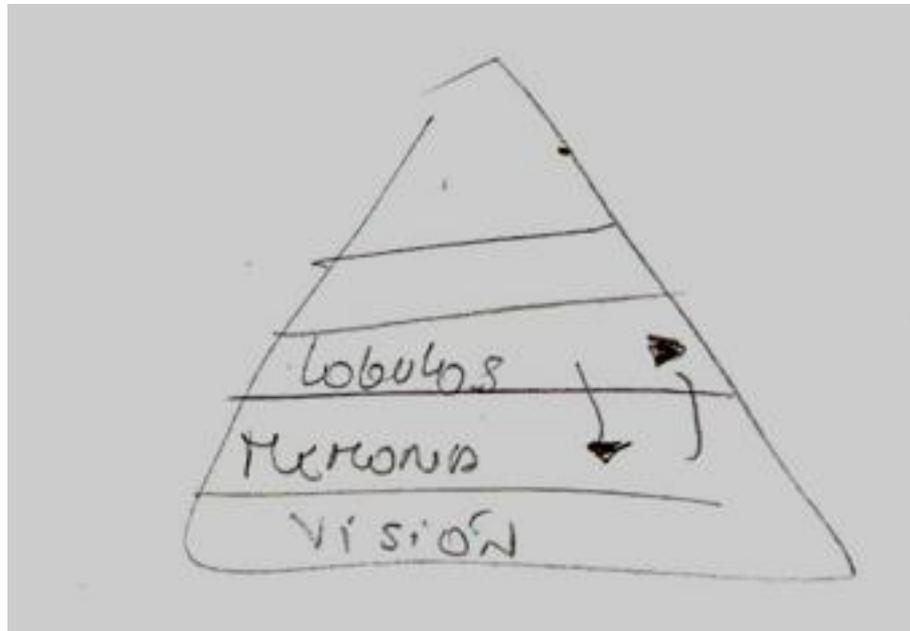


Fig. 39. Modelo 2 sobre los procesos involucrados en la percepción.

La representación en forma de pirámide intenta destacar el orden temporal en el que las estudiantes suponen en este momento que opera la percepción. Primero las sensaciones, luego la memoria y la actividad en zonas específicas del cerebro a las que ellas continuamente denominan “lóbulos”. Las flechas son indicadores de la interacción entre la memoria y los lóbulos. Es interesante destacar además que usar una pirámide como esquema de diagramación también indica que las sensaciones y la memoria son la base principal.

En este momento se utilizan dos analogías para mostrar de forma más precisa cómo ocurre el proceso de la sensación. Y se presenta además la división de las áreas del cerebro según Brodmann (Fig. 40), con el fin de enriquecer aquella que les ha sido presentada en clases.

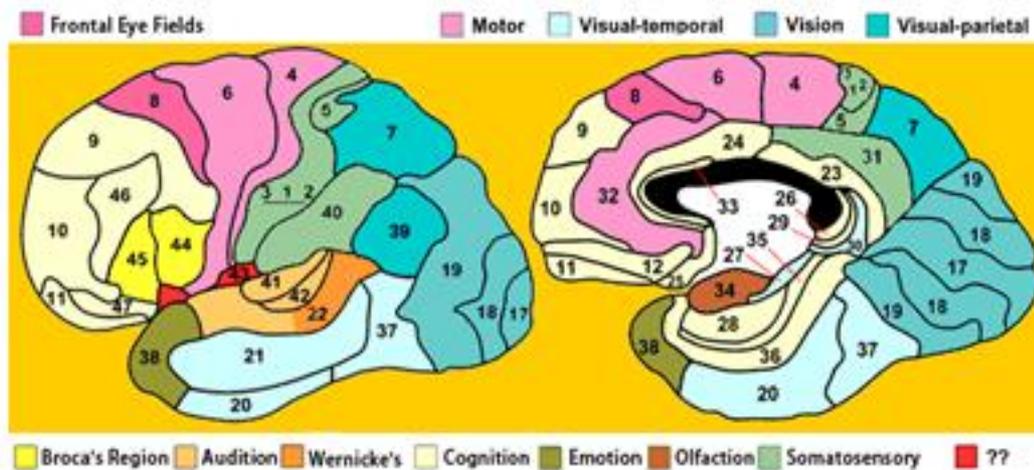


Fig. 40. Áreas de Brodmann

http://www.brain-maps.com/gehirn/brodmann_areale.jpg [Consulta: 10/07/2011]

La primera analogía explica cómo el cerebro utiliza información desde distintas fuentes sensoriales. Se recuerda a las alumnas que el Sistema Nervioso (SN) opera con una clase de información que es electroquímica y se les pregunta: ¿cómo es posible que, si la información capturada por nuestros sentidos desde el entorno es de distinto tipo, nuestro cerebro opere con un mismo tipo de información? Se usa analogía entre la transducción sensorial con el cambio de moneda:

“Nuestro SN trabaja con un solo tipo de información, tal como en un país se utiliza una sola moneda. Por lo tanto si alguien desea ingresar y comprar cosas en ese país debe cambiar su moneda. Así mismo, la información externa debe ser “cambiada” para que nuestro SN pueda trabajar con ésta. Estas “cajas de cambio” son nuestros receptores, que transforman esa diversidad de información proveniente de los sentidos a una del mismo tipo”

A través de esta *analogía simple y funcional* las estudiantes comprenden que hay un flujo de información desde el mundo externo y que al ser recibida por nuestro organismo es transducida para ser procesada por el SN. Esto contribuye a integrar conocimientos más precisos sobre el tema, pero deja abierta una interrogante, que es formulada de esta manera por las estudiantes: “¿Por qué las ideas de algo llegan a ciertos lugares?”. Cuando se les pide que aclaren esta pregunta señalan su inquietud sobre cómo cada área logra tener la información que le corresponde: “Si toda la información es del mismo tipo, ¿cómo no se “confunden?”. En este punto se utiliza la segunda analogía: la ruta que sigue la información en el SN se asemeja a los diversos recorridos que hacen los buses para llegar a ciertos terminales.

Esta última *analogía simple y estructural* les permite comprender que las informaciones provenientes desde distintas fuentes sensoriales siguen su propio camino y tienen su propio destino. Esta analogía les permite inferir que una vez que estos “buses” llegan a su destino, los pasajeros pueden dirigirse a otros y, así, la información puede traspasarse a otras áreas no sensoriales, como, por ejemplo, las relacionadas con la memoria y el lenguaje.

Antes de formular su explicación final redactan un borrador escrito (Fig. 41). Si bien este refleja la confusión que aún existe sobre cómo explicar la percepción, representa un avance en relación a su visión original. Demuestra, además, el intento de hacer confluir toda

la información recibida y aportada por las mismas estudiantes en una descripción unificada del proceso de la percepción.

Nosotros al recibir algo estamos utilizando de alguna forma nuestra memoria (recuerdos), y eso se va a distintas partes de nuestro cerebro que requieren ~~distintas~~ funciones y se diferencian la una de la otra porque están creadas para eso. El cerebro capta cada sensación que nosotros hemos ido adquiriendo a través del tiempo, nuestras percepciones para poder llegar a un centro o a un determinado lugar debe pasar por un recorrido, y ese recorrido ya está destinado. El cerebro logra que tomemos percepciones integradas con la ayuda de estímulos, que luego son percibidos analizados y finalmente transformados en reacciones o impulsos. Cada área del cerebro está asociada a algún sentido y *

Fig. 41. Borrador con explicación sobre como ocurre el proceso de la percepción.

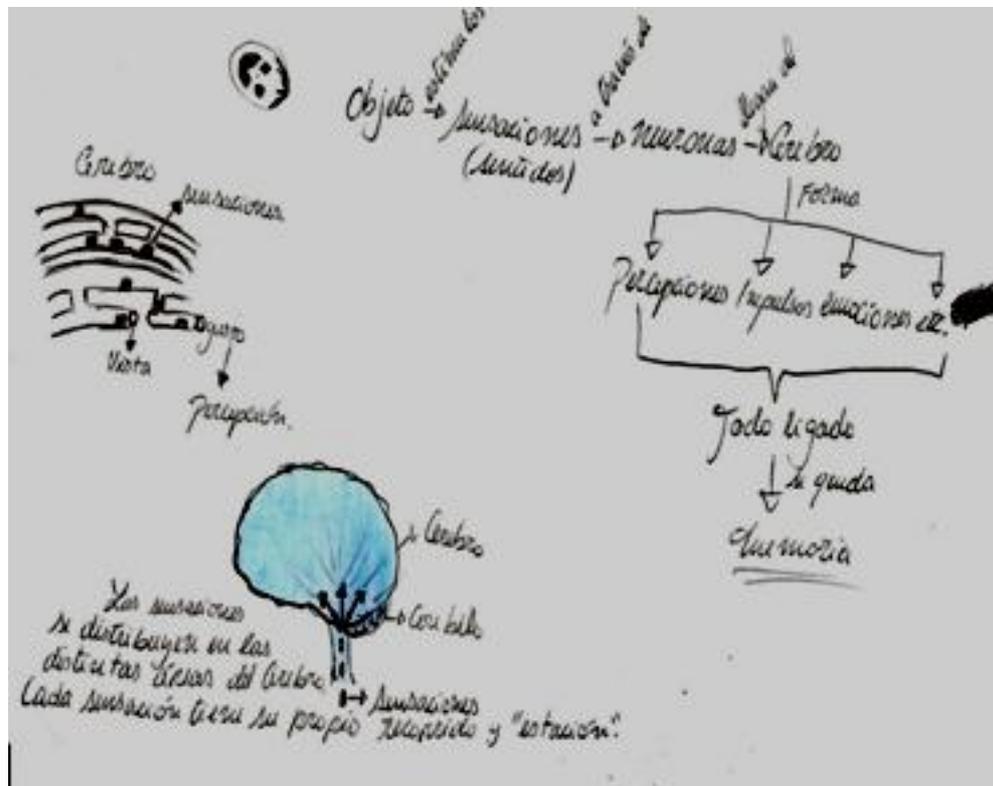


Fig. 42. Modelos finales sobre el proceso de la percepción.

Como finalización de esta actividad expresan sus conclusiones en los diagramas de la figura 42. Señalan que los tres diagramas integrados muestran cómo ellas comprenden el fenómeno luego de las actividades de aprendizaje desarrolladas. Es interesante notar la transformación de sus formas iniciales de representar, adaptándolas según la clase de información que se quiere destacar. El diagrama que está en la parte superior derecha destaca el orden secuencial/temporal del proceso de la percepción, mientras que el de la parte superior izquierda destaca la locación de la información al interior del cerebro, y el de la parte inferior izquierda, el flujo de la información desde los sentidos hacia el cerebro.

Las actividades que se desarrollaron en esta experiencia de aprendizaje se enmarcan en los tres niveles más básicos (3, 2 y 1) de la propuesta de los seis niveles de organización curricular de Clement (2008b) que fue analizada en la sección anterior. Estas se planificaron para conformar un proceso de co-construcción donde la elaboración de modelos está andamiada por la interacción entre el profesor y las estudiantes. En esta experiencia EABM se utilizaron estrategias como la *inspección*, las *preguntas discrepantes*, la *predicción*, la *disonancia productiva* y *analogías*. El uso de cada una de esas estrategias fue proyectado con anterioridad, pero se tomó la decisión de utilizarlas en el momento del desarrollo de la clase. En particular las analogías aplicadas se pensaron previamente, pero el lugar y rol que tuvieron en la elaboración de modelos fue decidido en el curso de la clase. Se utilizaron *diagramas* tanto como medio de realizar representaciones como forma de presentar información nueva.

Esta breve experiencia de EABM permite extraer tres conclusiones sobre la aplicación de estrategias de RBM en educación. Primeramente, concluyo que aunque es necesario trazar una ruta de aprendizaje ideal que conducirá desde las concepciones previas hacia los objetivos de aprendizaje (que en este caso consistía en elaborar un modelo sobre cómo ocurre la percepción humana), esta secuencia no se desarrolla de forma enteramente previsible. Es necesario, por lo tanto, que el docente mantenga una constante atención sobre los pasos que sigue el proceso de razonamiento, para ir introduciendo estrategias de enseñanza y aprendizaje pertinentes en cada momento. Esto significa que al delinear una ruta de EABM hay que considerar vías alternativas o la eventualidad de desvíos, siempre manteniendo la atención en el objetivo que se busca conseguir. Desde el punto de vista del docente, es necesaria una claridad y dominio sobre cuáles son las estrategias de enseñanza y aprendizaje que forman parte en general de un proceso de EABM, para determinar cuáles específicamente serán pertinentes de aplicar según el desarrollo de una clase. En segundo lugar, concluyo que las estudiantes asimilan bien la forma de trabajo en EABM. Aunque en un comienzo se mostraron tímidas al tener que dibujar un esquema o diagrama (por no saber como hacerlo), a medida que avanzó la clase notaron lo necesario y útil que era para dar a entender sus puntos de vista y que las representaciones visuales además de ayudarlas a comunicar lo que pensaban, también enriquecían su propia reflexión. Constató, entonces, lo importante que es desde una perspectiva de EABM el educar en habilidades para representar visualmente. En tercer lugar, destaco que la actividad se desarrolló sin inconvenientes. Las estudiantes se involucraron y participaron de todo el proceso en forma colaborativa. Sin embargo, esto no asegura que una clase con estas características se desarrolle de forma exitosa en un grupo de 30 o más alumnos.

Examinando los modelos expresados por las estudiantes que participaron de esta actividad, se aprecia un considerable cambio desde el modelo inicial y los que elaboraron en la finalización del proceso. Esto lo explico principalmente porque a medida que se desarrolló

la clase se asimiló naturalmente que la resolución del problema estaba mediada por el desarrollo de modelos.

2.4. Recapitulación.

Desde una perspectiva instruccional se ha mostrado como el RBM se aplica en un enfoque que se denominó EABM (Enseñanza y aprendizaje basado en modelos). Dentro de esta línea se ha escogido la propuesta de John Clement quien acoge la influencia del RBM en educación desde diversos frentes. Una perspectiva analiza el RBM diseminado en un conjunto de estrategias y modos de enseñanza y aprendizaje que el autor recoge bajo el concepto de co-construcción. Otra aplica el RBM en la comprensión del proceso de evolución de las representaciones modélicas en una estructura curricular que distingue niveles de enseñanza. Y finalmente una que entiende el desarrollo del RBM en educación como un proceso cíclico que atraviesa fases de generación, evaluación y modificación de modelos (ciclos GEM).

Específicamente se reconoce que las prácticas de EABM tienen el objetivo de producir cambio conceptual en las representaciones de los estudiantes. Esto se lleva a cabo a partir de la implementación de una ruta de aprendizaje, que está definida, primero, en su punto de llegada por los modelos conceptuales que constituyen el objetivo de las actividades de enseñanza y aprendizaje, y luego, por los conocimientos previos de los estudiantes, que establecen el punto de partida.

El proceso a través del cual se cumple esta ruta de aprendizaje contempla el desarrollo de experiencias para la generación, la evaluación y la modificación (ciclos GEM) de modelos. En este proceso tanto profesores como estudiantes participan haciendo uso de estrategias cognitivas que se desenvuelven complementariamente en una interacción dialógica y cooperativa. Clement, denominó co-construcción a este proceso de elaboración conjunta de representaciones modélicas entre estudiantes y profesor.

A través de la aplicación del RBM en la enseñanza de las ciencias en distintos niveles de educación, Clement pudo constatar la existencia de coincidencias que permiten elaborar una propuesta curricular de EABM. Esta se articula en seis niveles clasificados por orden temporal, considerando los tiempos asignados al cumplimiento de los objetivos más generales relativos a la planificación curricular, luego aquellos que se requieren para el desarrollo de unidades, para el tratamiento de elementos de un modelo en particular, hasta llegar a las actividades de menor duración, como plantear una pregunta.

Se identificaron diversos modos y estrategias presentes en el enfoque de EABM. Los modos se definen como un conjunto de estrategias que cumplen una función en la construcción de modelos: ponerlos en competición, refutarlos, confirmarlos, o adicionarles información. Dentro de las estrategias que forman parte del enfoque de EABM se encontraron las de inspección, las preguntas discrepantes, las predicciones y las analogías. Se destaca dentro del proceso de construcción de modelos la generación de disonancia productiva, debido a que el cuestionamiento sobre las concepciones que ya se poseen se considera el primer impulso para la evaluación de las representaciones y el cambio conceptual.

En este capítulo se han presentado además los casos de S2 y de estudiantes de enseñanza media donde se aplican estrategias de RBM para desarrollar la explicación a

un problema. Del examen de estos dos casos se desprende que el proceso de EABM debe considerar la elaboración de modelos desde una perspectiva flexible, que no sigue una secuencia fija pasos, pero que si tiene un rasgo particular al incorporar un conjunto de prácticas de razonamiento específicas, como el uso de analogías, diagramas, simulaciones y experimentos mentales.

2.5. Conclusión.

De lo expuesto en este capítulo constato que la incorporación de una teoría como el RBM en la educación implica la elaboración de nuevas categorías de análisis para entender el fenómeno de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias, en lo que se refiere a las habilidades involucradas, la forma en que se planifican y estructuran unidades de aprendizaje. Desde un punto de vista cognitivo, las actividades de EABM se vislumbran exigentes ya que requieren de un alto compromiso y participación, tanto de los estudiantes como del docente. Un ejemplo de esto es que la propuesta curricular evidencia que el camino o ruta de aprendizaje que se desarrolla a través de la co-construcción puede ser planificado en cuanto a sus metas, pero el recorrido que conduzca a ellas va a ser en gran medida dependiente de las interacciones que ocurran entre profesor y alumno, las que no son enteramente predecibles y requieren de una observación constante. En este sentido, la propuesta sobre EABM presentada en este capítulo requiere de profesores altamente capacitados en su disciplina, pero además que sepan aplicar de manera flexible las estrategias y modos de enseñanza y aprendizaje que potencian el RBM.

En la propuesta y casos analizados, relación entre RBM y educación se caracteriza por una natural confluencia desde el ámbito teórico a su aplicación práctica. La explicación sobre cómo opera el razonamiento que configura la teoría sobre RBM conduce sin dificultades hacia la formulación de una propuesta instruccional. Esto básicamente porque la teoría del RBM se concentra en el estudio del razonamiento como un proceso que involucra la utilización de ciertas habilidades cognitivas específicas que son fáciles de identificar en la práctica. La teoría sobre RBM al contar con un sustento teórico, experimental e histórico-cognitivo (del modo como Nersessian lo entiende) y al estar relacionada con otras explicaciones sobre la cognición humana, se convierte en una alternativa interesante para extraer contribuciones para la educación.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha tenido por tema el RBM como perspectiva para explicar los procesos de razonamiento desde una perspectiva no formal, sin recurrir a una explicación en base a la aplicación de reglas lógicas. La teoría del RBM especialmente se concentra en el estudio de aquellos procesos que conducen al cambio conceptual y que explican la creatividad científica. Dicho tema se abordó, en la primera parte presentando este enfoque teórico en el marco de las ciencias cognitivas y, en la segunda parte, explicando cómo decanta hacia su aplicación en una propuesta para la enseñanza y aprendizaje de las ciencias que se denominó EABM.

La hipótesis planteada al inicio de este trabajo es la siguiente:

La visión defendida por algunos autores al interior de las ciencias cognitivas sobre el rol fundamental de los modelos en el pensamiento y el razonamiento humano constituye una sólida aproximación a la comprensión de los procesos de resolución de problemas y creatividad científica y es, a su vez, potencialmente fecunda para la generación de estrategias de planificación y didáctica para la enseñanza de las ciencias.

Para la evaluación de esta hipótesis se han propuesto un conjunto de objetivos mencionados en la introducción. Estos se resumen en dos grandes objetivos que configuraron el cuerpo de esta tesis:

1. Evidenciar que el RBM, como teoría sobre el cómo opera el razonamiento humano, constituye una sólida aproximación a la comprensión de los procesos de resolución de problemas y creatividad.
2. Evidenciar que el RBM constituye una perspectiva potencialmente fecunda para la generación de estrategias didácticas y la planificación curricular en la enseñanza de las ciencias.

Analizaré el cumplimiento de cada uno de estos objetivos por separado y luego finalizaré con una evaluación de la hipótesis en su conjunto.

Sobre el primer objetivo, se mostró que la teoría sobre RBM constituye una alternativa para comprender los procesos de razonamiento que se ajustan a los contextos reales en que estos ocurren. Presenta una perspectiva sobre como los humanos nos representamos el mundo y resolvemos problemas considerando el contenido de la información. La perspectiva sobre RBM considera que es la interpretación de la información y las representaciones que se hace en base a esta lo que determina el proceso de razonamiento y la resolución de problemas. La teoría sobre RBM en el examen realizado en esta tesis se ha evidenciado como una aproximación legítima para comprender cómo razonamos sin recurrir al uso de aplicación de reglas lógicas.

Es interesante destacar el amplio espectro de procesos de resolución de problemas que pueden ser comprendidos remitiéndose a la teoría sobre RBM. Desde los contextos más cotidianos hasta el ámbito científico. Si consideramos los casos y ejemplos que se utilizaron para el desarrollo de esta tesis, se constata que el RBM trasciende las diversas

manifestaciones de la cultura humana, aun cuando el énfasis se haya puesto en el rol del RBM en el razonamiento científico.

Otro argumento a favor de la legitimidad del enfoque sobre RBM es que al indagar cuales constituyen sus sustratos cognitivos, se descubre que es una práctica que involucra el uso de habilidades que son características de la manera como los seres humanos efectivamente nos relacionamos con el mundo. Considera además la importancia de los contextos socio-culturales, de la experiencia directamente relacionada con el mundo y la conexión estrecha entre cuerpo y mente. La teoría sobre RBM no requiere abstraer de todos esos componentes de la vida humana para dar cuenta sobre como opera el razonamiento, sino que las incluye.

Como explicación al proceso de resolución de problemas la teoría sobre RBM presenta una perspectiva que integra concepciones que en psicología cognitiva han constituido líneas de investigación importantes. Por ejemplo, las relativas a los clásicos problemas sobre conceptos y representaciones. En el caso específico de esta investigación se destacó el estudio del rol de las analogías y el proceso de bootstrapping en el razonamiento. La inclusión del uso de las analogías en una teoría más general sobre como opera el razonamiento y la creatividad, constituye un intento de elaborar una explicación que integre los hallazgos de diversas líneas de investigación en ciencias cognitivas. El proceso de bootstrapping como explicación del cambio conceptual y la creatividad sigue la misma orientación.

La explicación de la creatividad científica sostenida por la teoría sobre RBM presenta un análisis lo suficientemente detallado como para convertirse en una explicación legítima de dicho proceso. Al entender la creatividad como un proceso especial de pensamiento que no se aleja de nuestra forma de razonar en contextos cotidianos, se desmitifica el concepto de creatividad y se lo traslada a un ámbito más concreto. Esto aporta claridad a la explicación sobre el proceso creativo desde la teoría de RBM, principalmente porque permite trazar una secuencia de pasos que conducen a un razonador al establecimiento de asociaciones e inferencias significativas para la producción de nuevas ideas, o determinar los procesos y habilidades específicas para esto ocurra.

En síntesis, sobre el primer objetivo señalado considero que teniendo en cuenta la información expuesta en esta investigación, la teoría sobre RBM aspira a constituirse como una sólida aproximación a la comprensión de los procesos de resolución de problemas y la creatividad.

Sobre el segundo objetivo, la teoría sobre RBM es explícita sobre las habilidades cognitivas concretas involucradas en la resolución de problemas y el cambio conceptual. Esto aporta con un referente claro sobre el repertorio de procesos cognitivos necesarios para conducir actividades de EABM. Al concebir la creatividad y el cambio conceptual como procesos que se sustentan en la utilización de ciertas habilidades cognitivas específicas, es posible proyectar rutas de aprendizaje que incorporen explícitamente la utilización o desarrollo de dichas habilidades, como por ejemplo, la simulación, la elaboración de diagramas, la creación y uso de analogías, la interpretación, descubrimiento e incorporación de constreñimientos, etc.

El RBM es una perspectiva que sitúa el razonamiento en contextos reales de razonamiento donde tienen un papel central las representaciones externas y los colaboradores de investigación. Esto también permite una transición hacia el ámbito educativo donde las prácticas de enseñanza y aprendizaje están embebidas en entornos socio-culturales. Además, la teoría sobre RBM se ajusta a las necesidades de las prácticas

educativas porque el proceso de aprendizaje entendido desde un punto de vista cognitivo puede ser concebido como un fenómeno de cambio conceptual.

El enfoque sobre EABM expuesto en el segundo capítulo de esta tesis da cuenta de una variedad de formas que puede adoptar la aplicación de RBM en educación. Desde la elaboración de una propuesta curricular hasta la realización de actividades de corta duración. La teoría sobre RBM, como se aprecia a través del enfoque de EABM presentado, permite la creación de categorías específicas para comprender el proceso de construcción y utilización de modelos en educación sin perder de vista el fundamento teórico en el que se originan. El postular, por ejemplo que el proceso de construcción de modelos se estructura en ciclos GEM (de generación, evaluación y modificación de modelos) es concordante con la idea del bootstrapping y la estructura general que tanto Johnson-Laird como Nersessian reconocen en el RBM. Hay una base común en estas teorías que comprende que el proceso de construcción de modelos está sometido a una evaluación y revisión constante que culmina solo cuando el razonador ha encontrado una respuesta satisfactoria. En este proceso se reconocen instancias preliminares de interpretación de la información que se traduce en la generación de representaciones modélicas iniciales. Luego hay un momento de evaluación donde se indaga sobre la capacidad explicativa de las representaciones modélicas creadas, se analizan los constreñimientos existentes y se postulan nuevos, se predice cómo se comportará el fenómeno en relación a las representaciones elaboradas, si un modelo en particular es útil, si existen otros que compiten con este por constituir una mejor explicación, etc. La evaluación conduce a la modificación de los modelos, se generan así otras representaciones las que a su vez vuelven a ser sometidas a evaluación.

Quizá una de las diferencias más importantes entre la utilización del RBM en educación y la aplicación en la solución de problemas en general, es que en educación existe un profesor encargado de encauzar el proceso de EABM, por lo tanto no es una práctica que conduzca a la creatividad en un sentido estricto, es decir, donde el razonador por su propia cuenta genere concepciones novedosas. Con esto quiero decir que en la EABM el desarrollo del cambio conceptual no es autogestionado, sino apoyado intencionadamente en la intervención del docente. Además, el cambio conceptual en el contexto de la EABM es un proceso que está dirigido hacia la elaboración de representaciones adecuadas o concordantes con los modelos científicos que se tienen en vista como target de las unidades de aprendizaje. Por lo tanto no se desarrolla la creatividad, entendida como la producción de concepciones novedosas en sentido amplio, sino sólo para el sujeto que las desarrolla. No obstante, la propuesta de EABM es una forma de educar en la utilización de RBM, por lo tanto se podría reconocer su función en la preparación para el razonamiento creativo.

Sobre el segundo objetivo, sostengo en base a lo expuesto en el capítulo segundo que el enfoque sobre EABM muestra que efectivamente la teoría sobre RBM es una perspectiva potencialmente fecunda para la generación de estrategias didácticas y de planificación curricular en la enseñanza de las ciencias.

Respecto a la hipótesis de investigación señalo que ésta se encuentra confirmada parcial y provisionalmente. Para afirmar esto me baso en el reconocimiento de que existen otras investigaciones y propuestas que vinculan RBM y educación que pueden ser examinadas y que se dejaron fuera de la investigación por las restricciones naturales de tiempo y extensión de este trabajo. Además porque la misma teoría sobre RBM se encuentra actualmente en desarrollo y en esta investigación no se ha informado sobre todos los tópicos que esta involucra. No obstante considero que esta investigación contribuye con informar sobre la existencia de propuestas que vinculan el RBM con educación, la consistencia que tienen y analizar el problema sobre la aplicación de una teoría de las

ciencias cognitivas en educación. La propuesta instruccional analizada de EABM muestra cómo es posible transitar desde el ámbito de las ciencias cognitivas hacia la educación, cumpliendo con la satisfacción de requerimientos de carácter pedagógico manteniendo una coherencia con el sustento teórico que le da sentido.

Bibliografía

- Asimov, I. (1959/1997) *Momentos estelares de la ciencia..* Alianza Editorial, Madrid.
- Bailer-Jones, D. (1999) Tracing the development of models in the philosophy of science. En: L. Magnani & N.J. Nersessian & P. Thagard (Eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery* (pp. 23-40). New York: Kluwer Academic/Plenum.
- Bandura, A. (1977). *Social learning theory*. New York: General Learning Press.
- Barsalou, L. (2008) Grounded cognition. *The Annual Review of Psychology*. 59, 617–4. Disponible en: http://www.psychology.emory.edu/cognition/barsalou/papers/Barsalou_ARP_2008_grounded_cognition.pdf
- Barsalou, L. (2010) Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science* 2 (2010), 716–724. Disponible en: http://www.psychology.emory.edu/cognition/barsalou/papers/Barsalou_topiCS_2010_grounded_cognition.pdf
- Boulter, C.J., Buckley, B.C., (2000). Constructing a typology of models for science education. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp. 41 – 57). Kluwer Academic Publishers.
- Buckley, B., Boulter, C.(2000) Investigating the role of representations and expressed models in building mental models. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp. 119 – 135). Kluwer Academic Publishers.
- Cabello, M.I. (2011) *Química 2do medio*. Ediciones Cal y Canto. Edición especial para el Ministerio de Educación del Gobierno de Chile.
- Clement, J.L. (2008a) Student/teacher co-construction of visualizable models in large group discussion. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 11-22). Springer.
- Clement, J. (2008b) Six levels of organization for curriculum design and teaching. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 255 – 272). Springer.
- Clement, J.L. (2009) *Creative model construction in scientist and students. The role of imagery, analogy, and mental simulation*. Springer.
- Damasio, A. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* . 351(1346) 1413-1420.
- Else, M.J., Clement, J., Rea-Ramirez, M.A. (2008) Using analogies in science teaching an curriculum desing: Some Guidelines. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 215 – 231). Springer.
- Fauconnier, G., Turner, M. (2008) Rethinking metaphor. En: Gibbs, R. (Ed.), *Cambridge Handbook of Metaphor and Thought* (pp. 53 – 66). New York: Cambridge University Press.

- Flores, L., Manríquez, G. (2009) *Biología 3ero medio*. Editorial Santillana. Edición especial para el Ministerio de Educación del Gobierno de Chile.
- Franco, C., Colinvaux, D. (2000) Grasping mental models. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp. 93 – 118). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Galagovsky, L., Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias*. 19 (2), 231 -242. Disponible en: <http://ensciencias.uab.es/revistes/19-2/231-242.pdf>
- García Madruga, J. A., Johnson-Laird, P. N. (1988) Entrevista a Philip N. Johnson-Laird. *Cognitiva*. Vol. 1 (3), 311 - 333. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2664624>
- Gentner, D. (1983) Structure mapping: a theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170.
- Gentner, D (1998). Structure mapping in analogy and similarity. En: Thagard, P.(Edit.), *Mind Readings : Introductory Selections on Cognitive Science*. (pp. 127-156). Cambridge, MA: MIT Press.
- Giere, R.N. (1999) Using models to represent reality. En: L. Magnani & N.J. Nersessian & P. Thagard (Eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery* (pp. 41-58). New York: Kluwer Academic/Plenum.
- Giere, R. N. (2002). Scientific cognition as distributed cognition. En: P. Carruthers & S. Stich & M. Siegal (Eds.), *The Cognitive Basis of Science* (285-299). Cambridge University Press.
- Gilbert, J.K., Boulter, C.J., Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and desing and technology education. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp.3-17). Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, J.K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A., Franco, C. (2000) Science and education: Notions of reality, theory and model. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (19-40). Kluwer Academic Publishers.
- Greca, I. M., Moreira, M. A. (1998). Modelos mentales, modelos conceptuales y modelización. Disponible en: <http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewPDFInterstitial/6895/6355>
- Greca, I. M., Moreira, M. A. (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. Disponible en: http://www.pviov.net/recursos/psicopedagogia/pdf/Modelos%20Mentales_02.pdf
- Holyoak, K. J., Thagard, P. (1997) The analogical mind. *American Psychologist*. 52(1), 35-44.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the wild*. Cambridge, MA:MIT Press.
- Johnson-Laird, P.N. (1983), *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (1989). *Mental models*. En: Posner, M. I. (ed.), *Foundations of Cognitive Science* (pp. 469-499). Cambridge, MA: MIT Press.

- Johnson-Laird, P. N. (1990). *El ordenador y la mente*. Editorial Paidós, Barcelona.
- Johnson-Laird, P. N. (2001). Mental models and deduction. *Trends in Cognitive Science*. 5 (10), 434-442.
- Johnson-Laird, P.N. (2004). The history of mental models. En: Manktelow, K., and Chung, M.C. (Eds.) *Psychology of Reasoning: Theoretical and Historical Perspectives* (pp. 179-212). New York: Psychology Press.
- Johnson-Laird, P.N. (2005). *Mental models and thought*. En: Holyoak, K. J., Morrison, R. G.. *The Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning* (pp. 185-208). Cambridge University Press.
- Johnson-Laird, P.N., Mancini, F. (2006) A hyper-emotion theory of psychological illnesses. *Psychological Review*, 113 (4), 822-841.
- Justi, R. S. (2000) Teaching with historical models. En: Gilbert, J.K. & Boulter, C.J. (Eds.) *Developing Models in Science Education* (pp. 209-226). Kluwer Academic Publishers.
- Kahn, S. (2008). Co-construction and model evolution in chemistry. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 59-78). Springer.
- Knauff, M., Fangmeier, T., Ruff, C., Johnson-Laird, P. N. (2003) Reasoning, models, and images: Behavioral measures and cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(4), 559-573.
- Kohan, W., Waksman, V. (1997) *¿Qué es filosofía para niños? Ideas y propuestas para pensar la educación*. Oficina de Publicaciones CBC, Universidad de Buenos Aires.
- Lakoff, G., Johnson, M. (2003) *Metaphors we live by*. London: The university of Chicago press.
- Lakoff, G., Núñez, R. E. (2000) *Where Mathematics Comes From: How the Embodied Mind Brings Mathematics into Being*. Basic Books.
- Lipman, M., Sharp, A.M. (1983) *Asombrándose ante el mundo: Manual del profesor para acompañar a Kio y Gus*. Madrid: Ediciones de la Torre.
- Lipman, M., Sharp, A.M. (1989) *En busca del sentido: Manual del profesor para acompañar a Pixy*. Madrid: Ediciones de la Torre.
- Nersessian, N.J. (1999) Model-based reasoning in conceptual change. En: L. Magnani & N.J. Nersessian & P. Thagard (Eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery* (pp. 5-22). New York: Kluwer Academic/Plenum.
- Nersessian, N.J. (2002) The cognitive basis of model-based reasoning. En: Carruthers, Smith y Siegal (Eds.), *The Cognitive Basis of Science* (pp. 133-153), Cambridge University Press.
- Nersessian, N.J. (2008) *Creating scientific concepts*. Cambridge: The MIT Press.
- Newell, A.; Simon, H. A. (1976), *Computer science as empirical inquiry: symbols and search*. *Communications of the ACM*. 19 (3): 113–126.
- Novak, J. D., Gowin, D.B. (1988) *Aprendiendo a aprender*. Barcelona: Ediciones Martínez Roca.

-
- Nuñez-Oviedo, M.C., Clement, J. (2008). A competition strategy and other modes for developing mental models in large group discussion. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 117-138). Springer.
- Pérez Bernal, M. (2007). Metáfora frente a analogía: Del pudín de pasas al fuego diabólico: Creatividad expresiva frente a creatividad cognitiva. *Thémata, Revista de Filosofía*, 38, 201-211. Disponible en: <http://institucional.us.es/revistas/themata/38/art12.pdf>
- Rea-Ramirez, M.A. (2008). Determining target models and effective learning pathways for developing understanding of biological topics. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 45-58). Springer.
- Rea-Ramirez, M.A., Clement, J., Nuñez-Oviedo, M.C. (2008). An instructional model derived from model construction and criticism theory. En: Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 23-43). Springer.
- Rea-Ramirez, M.A., Nuñez-Oviedo, M.C. (2008). Model based reasoning among inner city middle school students. En Clement, J. L. & Rea-Ramirez, M. A. (Eds.) *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 233-253). Springer.

Anexo

Cuestiones problemáticas entorno al RBM y educación.

En lo que sigue haré una breve descripción de aquellos puntos que se presentaron como problemáticos a lo largo de esta investigación, pero que dada su variedad, y complejidad en algunos casos, no fueron abordados. Los consigno en este anexo porque plantean temas abiertos para la discusión.

1. Sobre la existencia de una lógica mental.

Es un tema a considerar si detrás de todo el despliegue de elaboraciones modélicas que se ejecutan al razonar realmente no subyace alguna clase de lógica a un nivel más básico de la operación mental. Afirmar que ciertos procesos de razonamiento se fundan en modelos no se contrapone directamente con la idea de la existencia de una lógica mental, sino que simplemente no es preciso recurrir a ella para elaborar una explicación del razonamiento sobre el nivel específico de su ejecución en contextos reales. Quizá dependa del grado de profundidad y de la clase de caracterización que quiera hacerse sobre el razonamiento o qué se persigue explicar con la teoría. Postular la existencia del RBM no implica necesariamente que no exista algo semejante a una lógica mental. La teoría sobre RBM demuestra que es un enfoque que contribuye enormemente a explicar el razonamiento creativo y el cambio conceptual, pero esto no implica descartar que aún así exista una lógica metal en la que se funden ciertos procesos de razonamiento también.

2. Desafíos sobre el estudio de la creatividad

La creatividad es un fenómeno complejo de explicar en su origen. Por ejemplo, explicar cómo se originan las asociaciones que se convierten en la base para las analogías que conducen a un cambio conceptual y si es necesario que la mente posea una disposición o una formación especial para desarrollar tales asociaciones. La teoría del RBM presenta claras aportaciones a comprender el fenómeno de la creatividad pero está lejos de agotar el tema. Si se considera que un modelo se construye sobre la base de cumplir con ciertos constreñimientos, también es preciso estudiar también cómo se desarrolla la capacidad que tiene un razonador de reconocer qué información es relevante para resolver un problema y construir una representación.

¿Se puede enseñar a ser *creativo*? Consecuentemente con este trabajo parto de la definición de creatividad como innovación conceptual. Pero, ¿toda innovación conceptual ha de entenderse como esencialmente creativa? La innovación conceptual es necesaria para la creatividad, pero ¿la define completamente? Desde un punto de vista cultural, se sostiene que la creatividad consiste en el proceso de elaborar productos novedosos que son considerados valiosos. Explicar la creatividad, y educar en esta habilidad, no solo involucra desarrollar la habilidad para generar cambio conceptual, sino también la de reconocer el rol que dicha innovación tiene en el contexto de la cultura. No reconocer esto llevaría quizá a entender como sinónimas las nociones de cambio y creatividad. Esto remite a la necesidad de aclarar una pregunta más fundamental: ¿qué es la creatividad?

3. Ahondar en el estudio de las prácticas científicas.

Sobre RBM es preciso ahondar más en las prácticas científicas al interior de la ciencia “normal” – apelando directamente a la noción de Kuhn – con el propósito de constatar cómo el RBM forma parte también de este momento de la actividad científica y no solo de los grandes cambios conceptuales. La actividad científica por definición aspira a la generación de conocimiento, por lo tanto la investigación sobre RBM debe desarrollarse sobre toda actividad constitutiva del quehacer científico. Investigaciones en esta línea existen, pero no se consideraron para este trabajo.

4. Precisión sobre el significado del término ‘modelo’.

Respecto al concepto de “modelo”, y más específicamente, “modelo mental”, se ha constatado que es una noción bastante útil para referirse a las representaciones involucradas en el proceso de razonamiento. Pero a partir de esta investigación se desprende que el concepto de “modelo” tiene una acepción amplia, que podría dar pie a malas interpretaciones debido a la vaguedad de su significación en algunos casos. Pienso como ejemplo de esto, la definición de modelo como “análogo estructural”. Esta difícil de concertar con el uso de modelos a través de experimentos mentales, por su carácter más bien proyectivo e imaginario. En este caso quizá sería más apropiado entender que un modelo es una representación de simulación que opera según ciertos constreñimientos considerados relevantes para el razonador. Creo que en este sentido es necesario precisar con más exactitud qué es lo que se quiere significar bajo el término “modelo” y más aún “modelo mental”, en el marco de una explicación no formal del razonamiento.

5. ¿Puede ser el RBM más que un razonamiento fundado en modelos, uno *determinado* por los modelos que se pueden construir?

Un asunto para considerar más acuciosamente es el impacto que tienen las estrategias de representación científica en la explicación de los fenómenos. Partiendo de la base que el RBM está implicado sustancialmente en el proceso de investigación y generación conceptual científica, es interesante indagar en el rol de los instrumentos de observación, por las potencialidades y limitaciones que estos ofrecen para cierto tipo de modelado. En otras palabras, indagar el impacto de las estrategias para representar fenómenos en ciencias con el fin de hacerlos accesibles a la percepción (pienso en el caso particular de la biología). Es posible que la capacidad o la factibilidad para representar ciertos elementos de la realidad a través de diversos instrumentos determinen el razonamiento de los científicos. Como ejemplo pienso en el caso de Camilo Golgi y Santiago Ramón y Cajal en la biología. Ambos científicos utilizaban técnicas muy similares para hacer tinción de las células nerviosas y así observarlas. Ambos vivieron en el mismo tiempo, incluso compartieron la recepción del Premio Nobel el mismo año (no exento de polémica). Pero cada uno defendía una teoría distinta sobre la estructura del sistema nervioso. Mientras Golgi defendía una teoría reticular (donde las neuronas están conectadas como en una red a través de sus extensiones dendríticas) Ramón y Cajal fue el primero en constatar que entre una neurona y otra existía una pequeña separación, es decir que las neuronas forman un sistema de unidades discretas y no un tejido, como defendía Golgi. El punto crucial que llevó a esta diferencia fue la manera como Ramón y Cajal aplicó las técnicas de tinción utilizadas por Golgi, perfeccionándolas para lograr representar información que antes no había sido posible constatar. Presento este ejemplo para destacar que pueden ser, además de las habilidades cognitivas del razonador, los *medios* y *técnicas* de representación los que determinen la construcción de modelos, el RBM.

6. Sobre la génesis de la habilidad para razonar en base a modelos.

Otro cuestionamiento que emerge del examen de los temas tratados en esta tesis es sobre la génesis del RBM: si es una capacidad innata o que se desarrolla y perfecciona a medida que crecemos. O incluso si es un producto del andamiaje de nuestra cultura, una forma de razonar que surge según como nos vemos impelidos a relacionarnos con nuestro entorno. Quizá esta sea una de las problemáticas más difíciles de abordar, debido a la complejidad de factores que involucra. Pero aún si no se puede responder con claridad, queda abierto el problema sobre cómo evoluciona a lo largo de la vida de un ser humano la capacidad para operar con el RBM, qué la potencia, que la limita.

7. Sobre el rol de los conocimientos previos versus la capacidad para ejecutar el bootstrapping.

Un asunto también interesante de analizar es la fuente de las asociaciones que constituyen la base para una representación modélica. Analizar por ejemplo qué tan relevante son los conocimientos previos que se manejan antes de resolver un problema, frente a la capacidad para descubrir asociaciones novedosas. Sería interesante evaluar si la creatividad, entendida desde el punto de vista del RBM, radica más en contar con un espectro amplio de conocimientos para establecer conexiones novedosas o en la habilidad de hacer esas conexiones y conducir las de forma productiva. Quizá son los dos factores. Pero aún siendo de esa manera, se podría determinar específicamente la relevancia que cada uno en particular. Creo que esto arrojaría interesantes consecuencias para la formación de habilidades de RBM en educación.

8. Sobre las habilidades complementarias que sustentan el proceso de RBM.

Del estudio y consideración de los casos específicos donde se aplica el RBM se concluye que hay una serie de habilidades necesarias para conducir apropiadamente el proceso de generar, evaluar y modificar un modelo, que no están directamente reconocidas como parte de su “sustrato cognitivo”. Es necesario poseer habilidades en la comunicación del conocimiento, tanto verbales como diagramáticas, tener la capacidad de trabajar con información de diversa índole, desarrollar la flexibilidad suficiente para hacer conexiones novedosas, saber representar el conocimiento, tener conciencia de lo determinante que puede ser para razonar la manera como se elige representar las ideas que se tienen sobre un fenómeno. Creo que este listado se puede precisar mejor, algo que sería una clara contribución para desarrollar propuestas de EABM.