

# Los modelos de la Química

José Antonio Chamizo\*

*Una sección para trabajos sobre qué es la ciencia, cómo funciona internamente, como se desarrolla, sobre el origen de los conocimientos, de su fiabilidad, de cómo se obtuvieron, si ello ocurre con cooperación y colaboración, qué implicaciones tiene el juicio de los pares, para qué se utilizan comúnmente los conocimientos, qué beneficios reportan para la sociedad, etc. Un poco de lo que contiene hasta ahora la sección llamada QUIMOTRIVIA REJECTA, de la cual es responsable José Luis Córdova, es decir, la dimensión humana de la ciencia, es decir, el entusiasmo creador del investigador; los antecedentes ideológicos de las teorías científicas; la influencia de colegios invisibles y de modas; la amistad y el debate entre colegas; el orgullo del oficio; la paciencia; las pasiones; las preocupaciones educativas de los investigadores, etcétera.*

*...el laberinto es un temor  
pero es también una esperanza;  
es un temor porque estamos perdidos  
pero es una esperanza porque hay un centro  
porque hay un plano  
porque hay una arquitectura*  
J.L. Borges

## Abstract

In recent years the academic discussion about the nature of science (NOS) is becoming deeper and widespread. One approach has been model's construction characterization of NOS. In this paper, centered in chemistry, models with their peculiarities and limitations were recognized behind many concepts.

Finally its importance in the education of chemistry, practically at any educative level has been advised.

## I. Introducción

El repensar la química a través de sus modelos fue la propuesta original, hace casi veinte años, de Suckling (1987), continuando una línea de pensamiento iniciada varias décadas atrás por von Neumann alrededor de la física y las matemáticas. Éste como otros tantos asuntos que escapan de la "normalidad científica" fue prácticamente olvidado y es ahora cuando las estrechas recetas sobre la actividad científica, realizadas por los investigadores y trasladadas a las aulas por los profesores, fracasan en todo el mundo, cuando se vuelven a reconsiderar (Gilbert, 2000; Erduran, 2004). A lo anterior hay que agregar un reciente e intenso interés por incorporar en la ense-

ñanza de la ciencia las últimas discusiones filosóficas e históricas sobre estos temas y que se han concretado en diversas reuniones (IHPST, 2005) y revistas especializadas (Hyle, 2000).

Los modelos han jugado un papel extraordinariamente importante en el devenir del conocimiento. Aquí poco a poco se les irá caracterizando, buscando entender sus peculiaridades, rodeándolos, cercándolos y recordando siempre lo frágil que es el saber, lo anterior sin olvidar las siguientes tres preguntas, centrales en el terreno de la enseñanza de la ciencia, y que estarán presentes a todo lo largo de este trabajo:

- ¿Para qué enseñar?
- ¿Qué enseñar?
- ¿Cómo enseñar?

El pensador francés E. Morin nos adelanta una primera respuesta (2002, pag 65):

*El afrontar la dificultad de la comprensión humana necesitaría el recurso, no a enseñanzas separadas, sino a una pedagogía conjunta que agrupa al filósofo, al psicólogo, al sociólogo, al historiador, al escritor, y esto se conjugaría con una **iniciación a la lucidez**. La iniciación a la lucidez es en sí inseparable de una iniciación a la omnipresencia del problema del error.*

*Es necesario enseñar, y esto desde la escuela primaria, que toda percepción es una traducción reconstructora operada por el cerebro a partir de terminales sensoriales, y que ningún conocimiento puede dejar de ser una interpretación.*

## II. Sobre los modelos

Los modelos tienen varias características, identificaré las ocho de ellas menos controvertidas (Achinstein 1987; Giere 1997; Justi, 2002; Bailer-Jones, 2002), las discutiré brevemente y ejemplificaré a continuación:

1. son representaciones
2. son instrumentos
3. son analogías con la realidad

\* Facultad de química, UNAM, 04510 México DF.

Correo electrónico: jchamizo@servidor.unam.mx

Recibido: 24 de septiembre de 2005; aceptado: 10 de agosto de 2006.

4. son diferentes de la realidad
5. se construyen
6. se desarrollan de manera iterativa a lo largo de la historia
7. deben ser aceptados por la comunidad científica
8. pueden ser de dos tipos: icónicos y conceptuales

**1. Un modelo siempre esta relacionado con un objeto, un sistema, o un proceso. El modelo representa al objeto, sistema, o proceso.**

Obviamente los modelos lo son de "algo". El mundo real es tan extraordinariamente complejo, en cada objeto (por ejemplo un automóvil) o sistema (cómo el mapa del metro) o proceso (diversos pero van desde la combustión de un cerillo hasta, por ejemplo, la producción de cloruro de metileno) influyen tantas y tan diversas variables que para intentar entenderlo relacionamos un objeto, sistema o proceso del mismo, con un modelo. Como se verá más adelante, los modelos simplifican aquello que representan.

**2. Un modelo es un instrumento para responder las preguntas de la ciencia. Se emplea para obtener información que no puede obtenerse directamente.**

La ciencia no empieza en los hechos, sino en las preguntas. Los hechos no son independientes de los observadores y de sus maneras de ver el mundo. Por ello, en un momento y en una cultura determinados, es posible que todos los observadores coincidan en un cierto hecho. Hay hechos a los que no puede accederse directamente ya sea por su tamaño (un átomo o un hoyo negro), su lejanía (temporal como los dinosaurios o material como los hoyos negros) o complejidad (una rata macho Sprague-Dawley que se utiliza de manera estandarizada en las investigaciones biomédicas). Esta imposibilidad ha suscitado a lo largo de la historia diversas preocupaciones entre destacados científicos que incluso han querido desterrar las palabras que relacionan los modelos con la realidad. Las siguientes citas así lo indican par el caso particular de los átomos (Chamizo, 1996):

*Si estuviera en mis manos borraría la palabra átomo de la ciencia persuadido de que va más allá de la experiencia.*  
Dumas 1837

*No admito ni la ley de Avogadro, ni los átomos, ni las moléculas; me resisto a creer en lo que no puedo ver ni imaginar.*  
Sainte-Claire Deville, 1860

*Aunque no sepamos nada de lo que es un átomo, no pode-*

*mos evitar formarnos alguna idea de una pequeña partícula que se nos representa en la imaginación; y aunque nuestra ignorancia de la electricidad sea al menos igual, porque somos incapaces de decir si ella es una materia, o varias, o simplemente un movimiento de la materia común, o más bien un tercer género de potencia o de agente, sin embargo existe un número inmenso de hechos que nos autorizan a pensar que los átomos de materia están en cierta manera dotados de potencias eléctricas, o están asociados con estas potencias, a las que están obligados por sus cualidades más notables, en especial por sus afinidades mutuas.*

M. Faraday, 1833

Faraday centra el problema. Ya desde la primera mitad del siglo XIX se pedía a gritos (valga la metáfora) una explicación de la materia a través de los átomos. En esta dirección Savater nos recuerda (2004, pág. 81):

*... juzgamos irracional al que mantiene su adhesión a creencias contradictorias, aun sabiendo que lo son, o al que niega evidencias que le es imposible ignorar.*

**3. Los modelos guardan ciertas analogías con el objeto, sistema, fenómeno o proceso que representan. Son semejantes pero no enteramente, de manera que se pueden derivar hipótesis (y/o predicciones) del mismo y someterlas a prueba. Los resultados de esta prueba dan nueva información sobre el modelo, figura 1.**

Sobre esta relación Bailer-Jones comenta (2002, pág. 112):

Las analogías frecuentemente aparecen en la ciencia porque apoyan la función central de los modelos: la explicación.

**Figura 1.** Ejemplos de los modelos atómicos como analogías (año en que fueron propuestos y evidencia experimental que no pudieron incorporar)

- 1897, Thomson-budín con pasas (la existencia de los protones)
- 1911, Rutherford-núcleo con carga positiva (atracción de los electrones por el núcleo)
- 1913, Bohr-sistema solar (naturaleza ondulatoria del electrón)
- 1926, Schroedinger-aquí ya no hay analogía macroscópica (los electrones a pesar de tener la misma carga pueden ocupar espacios cercanos asunto que se explica a través del spin).

En su trabajo sobre los modelos Achinstein indica (1987, pág. 9):

El modelo de Bohr postula electrones que describen órbitas, por analogía con el sistema planetario. El modelo de la gota líquida para el núcleo atómico explica la fisión nuclear por analogía con la división de una gota líquida en dos gotas más pequeñas. El modelo nuclear de capas se desarrolló recurriendo a una analogía entre el núcleo atómico y las capas de electrones extranucleares. Esto concuerda con el punto anterior de que los modelos teóricos tienen por objeto proporcionar una representación útil de un sistema: para proporcionar una representación así, resulta útil muchas veces establecer una analogía entre el sistema en cuestión y algún sistema conocido que esté gobernado por leyes que se entienden y suponen que algunas de esas leyes, u otras similares, gobiernan también el sistema que se trata de describir en el modelo.

Aquí es fundamental “el grado de similitud” ya que nos remite de manera muy clara a que la analogía no es la realidad. De hecho la analogía se separa de la realidad que intenta representar una vez que ante la prueba experimental se encuentra información que no puede “acomodar”. Así, las analogías y los modelos que se construyen sobre ellas son reemplazables por otros que sí pueden incorporar la nueva evidencia.

Hoy el modelo atómico de Dirac, derivado de la mecánica cuántica relativista parece ser la mejor explicación que tenemos sobre el átomo de hidrógeno.

**4. Los modelos se *diferencian* de los objetos, sistemas, o procesos que representan. En general son más sencillos y lo que se les ha eliminado no tiene interés explícito para lo que fundamentalmente representan, figura 2**

Los modelos se construyen para responder una o varias preguntas sobre una determinada parte del mundo, por ello es crucial identificar el sentido del modelo, para qué se construyó, de dónde viene y de alguna forma a dónde va. Así se está en posibilidades de reconocer lo que se ha eliminado de la totalidad del mundo para poder entenderlo mejor. Por ejemplo, en el modelo atómico de Lewis-Langmuir que busca explicar la naturaleza del enlace químico y la estructura de las moléculas, el que los electrones no caigan al núcleo o que no se repelan entre sí, tiene poca importancia una vez que con su

**Figura 2.** Ejemplos de diferencias entre los modelos y los objetos, sistemas, o procesos que representan.

- Modelo atómico de Lewis (los electrones no se mueven, ni cumplen con la ley de Coulomb)
- Modelo de Debye-Hückel (soluciones infinitamente diluidas)
- Modelo de campo cristalino (ligantes como cargas puntuales)
- Modelo cinético de los gases (las partículas no tienen estructura interna)

uso se responde a las preguntas que importaban en su tiempo (y aún hoy en día) a los químicos, aquellas relacionadas con la estructura molecular (a las que respondía y aún hoy responde bien). Así lo indicaba Langmuir hace casi un siglo (1919, pág. 868):

El problema de la estructura de los átomos ha sido estudiado principalmente por los físicos, quienes consideran de manera muy pobre las propiedades químicas, las que en última instancia deben ser explicadas por una teoría de la estructura atómica. La gran cantidad de conocimientos que sobre las propiedades químicas se tiene y las relaciones como las que resume la tabla periódica deben emplearse como un mayor fundamento para la estructura atómica que los relativamente escasos datos experimentales obtenidos únicamente con ideas físicas.

**5. La *construcción* de un modelo es un compromiso entre las analogías y las diferencias que tienen con los objetos, sistemas, o procesos que representan, figura 3**

Así, cuando el modelo ideal no encaja con los datos empíricos obtenidos puede ser ampliado y corregido. El modelo del gas ideal es un ejemplo perfecto. Reconocidos sus logros pero evidenciando sus carencias Van derWaals introdujo dos constantes con “sentido físico” que modelaban mejor a los gases. Con la incorporación de dos nuevas constantes **a** y **b** mejoró la descripción de los gases representadas por la ecuación del gas “ideal”. Así, **a/v<sup>2</sup>** representa la atracción, entre sí, de las partículas cerca de las

**Figura 3.** Ejemplo del compromiso entre analogías y diferencias para la representación de los gases.

• Modelo de gas ideal	$p = RT/v$
• Modelo de Van der Waals	$p = RT/(v-b) - a/v^2$
• Modelo de Berthelot	$p = RT/(v - b) - a/Tv^2$

paredes del recipiente, y **b** considera que efectivamente estas partículas tienen un volumen propio. Este tipo de compromiso para los gases ha sido extendido por modelos como el de Berthelot o el de Beattie-Bridgeman (Atkins, 1998).

**6. Los modelos se desarrollan a través de un proceso iterativo en el cual la evidencia empírica permite revisar y modificar los presupuestos básicos de los mismos. Un modelo es generalmente uno, en una secuencia histórica en un área particular del saber científico**

La historia de la ciencia es rica en ejemplos de cómo las comunidades científicas han desarrollado modelos para explicar el mundo real y cómo éstos han ido evolucionando para ir acomodando la evidencia empírica acerca de los hechos observados. La figura 3 es un ejemplo de lo anterior. En la misma línea de pensamiento hay que recordar a Popper (citado por Savater, 2003, pág.117) cuando dice:

No disponemos de criterios de verdad y esta situación nos incita al pesimismo. Pero poseemos en cambio criterios que *con ayuda de la suerte*, pueden permitirnos reconocer el error de la falsedad.

**7. Un modelo es aceptado como conocimiento científico cuando ha sido publicado en una revista especializada. Como ya se dijo antes su permanencia histórica depende de la evidencia empírica que se apor e a lo largo del tiempo para sostenerlo o para refutarlo**

La ciencia es conocimiento público sujeto a comprobación por otras personas, generalmente científicos. Es esa posibilidad de repetir una y otra vez los experimentos y las observaciones en diferentes condiciones de tiempo y espacio, y validarlos comúnmente, lo que hace que el conocimiento científico sea objetivo y confiable. Así lo caracterizó el reconocido filósofo de la ciencia K. Popper (1979, pág. 108):

El conocimiento, en este sentido objetivo, es totalmente independiente de la pretensión de conocer de cualquiera; es también independiente de las creencias o de la disposición de cualquiera a asentir, a afirmar o a actuar. El conocimiento en sentido objetivo es un conocimiento sin conocedor, es conocimiento sin sujeto cognoscente.

Uno de los ejemplos más famosos de lo anterior proviene de la astronomía. Cuando en 1687 Newton publicó su *Principia* lo que hizo fue describir el

mundo físico a partir de modelos que no hacían referencia explícita a objetos del mundo real. Unos años más tarde, en 1695, E. Halley un astrónomo y amigo de Newton aplicó dichos modelos para explicar el movimiento de los cometas. Así pudo predecir que a finales del entonces lejano 1758 regresaría un cometa que se había observado en 1530-31, 1607-07 y 1682. El asunto no era tan sencillo una vez que junto con estas observaciones “confiables” de cometas había al menos otras 24 en otras tantas fechas. Halley publicó su trabajo en 1705 el cual fue recibido con entusiasmo en Inglaterra y, como era de esperarse, con escepticismo en Francia. Pasaron los años, Halley murió 15 años antes de 1758 pero para ese entonces la evidencia experimental sobre los modelos de Newton era tan amplia que en 1756 la misma Academia de Ciencias de Francia ofreció un premio a la predicción más exacta del retorno del cometa, el cual apareció, ya bautizado como cometa Halley antes de la navidad del esperado 1758.

**8. Los modelos pueden ser: icónicos y conceptuales**

De entre las muchas y diversas clasificaciones de los modelos la adelantada por Bruner (1967) y aquí simplificada parece ser de las más relevantes para discutir el aprendizaje. Así, entre los primeros tipos de modelos tenemos sobre todo imágenes u objetos de tamaño diferente a lo que representan: mapas, o los aviones y automóviles a escala que se prueban en los túneles de viento para mejorar su desempeño (no el de ellos, sino el de los aviones y automóviles reales).

Los segundos son aquellos relacionados con el lenguaje, ya sea a través de fórmulas matemáticas o de símbolos (como es el caso del lenguaje químico, Chamizo, 2005).

El filósofo F. Suppe (1989) reconoce tres tipos de leyes:

- de coexistencia (estados del sistema) como  $PV = nRT$
- de sucesión (trayectorias en el tiempo) que para el caso de la química puede ejemplificarse con  $k_t = \ln ([A]_0 / ([A]_0 - x))$
- de interacción (entre dos o más sistemas) como es el caso de la interacción entre una partícula y el aparato de medición o también la situación descrita por Schroedinger,  $H\Psi = E\Psi$

Actualmente se discute si la ciencia puede expresarse sin la necesidad de leyes (Giere, 1999) y si los modelos conceptuales pueden ser identificados con éstas.

En caso de serlo, la clasificación de Suppe puede resultar también, con las cautelas del caso, una clasificación de los modelos conceptuales.

La caracterización de los modelos que acabo de presentar representa un enorme desafío a la visión tradicional de la química, una vez que “asuntos” como: orbitales moleculares, número de oxidación, ácidos y bases duros y blandos, sustitución nucleofílica bimolecular,  $PV = nRT$ , octeto de valencia, primera ley de la termodinámica, aromaticidad, entropía, enlace covalente,  $t_{1/2}$  hibridación, fuerzas de van der Waals, campo cristalino, Debye-Hückel, toxicidad, etc...para ejemplificar sólo algunos de ellos...ison modelos!...no realidades. Giere (1999) lo resume utilizando el esquema mostrado en la figura 4 y Erduran recientemente lo califica así (2004, pag 130).

para aspirar a un aprendizaje efectivo de la química en los salones de clases hay que mostrar lo que “los químicos hacen”, es decir modelar la estructura y la reactividad de la materia.

### III. Sobre el APRENDIZAJE

La distinción entre modelos y realidad nos lleva a otro asunto, nuestro asunto, el del aprendizaje que es el que guía este trabajo. Recordando las preguntas presentadas en la Introducción se puede ahora intentar dar algunas respuestas. La pregunta ¿qué enseñar? puede mejorarse y contextualizarse a partir del trabajo de D. Hodson (2003, pág.647-648):

Hay un extenso reconocimiento entre los educadores de la ciencia que ésta es un producto de su lugar y su tiempo, intensamente relacionada con la cultura y las instituciones locales y profundamente influenciada por sus métodos de

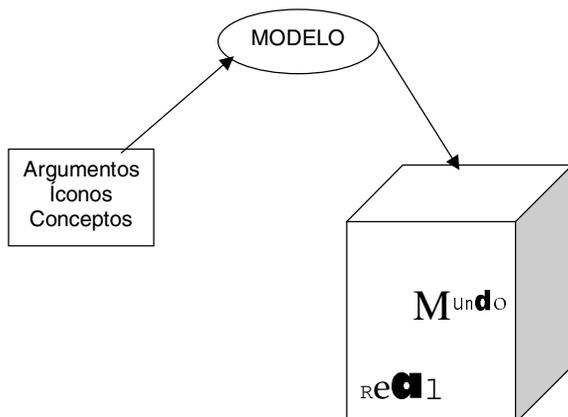


Figura 4. Los modelos y la realidad (Giere, 1999)

generación y validación... sin embargo, a pesar de lo mucho que se ha logrado, hay razones para estar muy preocupados. Muchos estudiantes no aprenden lo que nosotros quisiéramos: su conocimiento sobre la ciencia y la capacidad de usar tal conocimiento efectivamente están lejos de lo que ambicionamos; su entendimiento sobre la naturaleza y los métodos de la ciencia son generalmente incoherentes, distorsionados y confusos. ...Ahora, por primera vez en la historia, estamos educando alumnos para vivir en un mundo acerca del cual sabemos muy poco, excepto que estará caracterizado por un vertiginoso cambio y que será más complejo e incierto que el mundo de hoy...¿qué tipo de educación en ciencias es apropiada para preparar a nuestros estudiantes para ese desconocido mundo del futuro?”

La respuesta la da enfáticamente otro investigador inglés, G. Claxton, en su famoso libro *Enseñar mentes curiosas* (Claxton, 1994, en donde el subrayado es mío):

En el mundo en el que van a vivir los jóvenes, nada podría tener más valor que la capacidad de construir nuestra propia vida a medida que la vivimos: encontrar nosotros mismos qué es lo que nos satisface, conocer nuestros propios valores y nuestra propia mente, enfrentarnos a la incertidumbre con coraje e ingenio, y valorar lo que nos dicen los demás con un escepticismo inteligente y sano...La preocupación fundamental de una educación contemporánea útil debe centrarse en la capacidad de las personas para aprender bien. Cualquier otra prioridad, por muy apreciada que sea, que socave el compromiso de *fomentar la habilidad para el manejo del cambio* o nuestro éxito en hacerlo, deberá ser relegada o suspendida.

Así una tentativa y primera respuesta es: hay que enseñar para el cambio, para el incierto futuro.

La respuesta a la segunda pregunta, que sin duda tiene que ver con la primera y también con la tercera se encuentra en la ciencia escolar, cuya reciente fundamentación epistemológica (Izquierdo, 2003) permite relacionar y separar el hacer de los científicos profesionales con la actividad desarrollada en el aula, la cual se puede caracterizar alrededor de tres temas: la importancia de los procesos metacognitivos (por ejemplo hay que enseñar a los estudiantes

a pensar); la importancia de las ideas previas ( de los propios estudiantes... y, por qué no decirlo, de algunos profesores); la transposición didáctica (Izquierdo 2003, pág. 27):

La analogía del ‘estudiante como científico centrada en el método experimental como un proceso de justificación del conocimiento ha sido considerada apropiada por más de un siglo, pero hoy es insuficiente. La presente reflexión entre los expertos acerca de la ciencia y la educación en ciencias desde la perspectiva de la ‘nueva historia y filosofía de la ciencia y de las ciencias cognitivas cuestiona severamente esta analogía y sugiere nuevos campos de investigación en la enseñanza de las ciencias. Hoy contamos con un nuevo paradigma acerca de la ciencia que puede ser útil para la enseñanza de la ciencia, en el que se establece una conexión gradual entre los modelos teóricos propios de la ciencia y las representaciones mentales que los estudiantes tienen sobre los fenómenos naturales... La ciencia escolar debe permitir a los alumnos explicarse adecuadamente algunos de los fenómenos naturales que requieren para entender la sociedad en la que viven.

Por lo anterior hay que tener muy claro que lo que enseñamos son modelos y no realidades. Es en la explicitación de la enseñanza de los modelos y de la modelación donde se puede establecer de manera muy clara la distancia que separa la construcción teórica (científica, social, histórica) del mundo real y donde se puede gestar permanentemente la condición del cambio. Actualmente es bien reconocido que el conocimiento químico sobre una gran cantidad de fenómenos es producido y comunicado a través de modelos (Justi, 2002a).

Para responder a la tercera pregunta es pertinente la investigación de Grosslight (1991) en la que identificó la diferencia en cómo interpretan los modelos los expertos (es decir los científicos) de los aprendices (es decir los alumnos), figura 5. Pasar de la interpretación de los aprendices a la de los expertos es ya una primera respuesta, adelantada por Bruner en el lejano 1966, a “como” hacerlo. Para ello hay que construir (recordemos las características 4 y 5 de los modelos) y enseñar modelos didácticos (Chamizo 1991a, 1991b, 1992; Galagovsky, 2001; Sánchez Blanco, 2003; Caamaño, 2003), algunos de

**Figura 5.** Comparación en cómo interpretan los modelos aprendices y expertos

<b>Aprendices</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los modelos son <b>icónicos</b>.</li> <li>• Ayudan a comunicarse con el mundo real.</li> <li>• Modelos diferentes del mismo objeto, sistema, fenómeno o proceso muestran diferentes aspectos del objeto, sistema, o proceso real.</li> <li>• Los modelos pueden cambiar si son equivocados o se encuentra nueva información.</li> </ul>
<b>Expertos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los modelos son icónicos y <b>conceptuales</b>.</li> <li>• Los modelos ayudan a entender o pensar sobre un objeto, sistema, o proceso.</li> <li>• Diferentes modelos de diferentes objetos, sistemas o procesos pueden construirse para diferentes propósitos.</li> <li>• Los modelos son reemplazados por otros mejores.</li> </ul>

ellos históricos (Justi, 2000; Chamizo, 2007) y también hay que aprender a modelar (Justi, 2002), lo cual representa un problema para los docentes (Guevara, 2004). Pero no sólo esto, aquí también ayuda lo que escribió en su último artículo antes de morir la inglesa R. Driver, pionera en la investigación sobre las ideas previas de niños y adolescente, siguiendo las ideas propuestas por Giere (Driver, 2000) y refiriéndose a las actividades “científicas” en los laboratorios de investigación y en las aulas:

La actividad principal de los científicos es evaluar cuál de entre dos o más modelos rivales encajan con la evidencia disponible y por lo, tanto cuál representa la explicación más convincente para determinado fenómeno en el mundo.

Si ésta es la actividad principal de los científicos una de las herramientas imprescindibles para hacerlo, y que por ello es necesario incorporar en los currículos de ciencias, como adelanta la misma Driver, es la argumentación, la argumentación racional como también lo ha ejemplificado Jiménez-Aleixandre (2000).

Finalmente y volviendo de alguna manera al principio, como Morin indica, la enseñanza de los modelos, como algunos de los varios (los correctos y los equivocados con la argumentación necesaria para así ser reconocidos) que construyen las comunidades de científicos y que pueden también construir los alumnos en las aulas, puede ser uno de los caminos a la lucidez.

## Referencias

- Achinstein, P., *Los modelos teóricos. Seminario de problemas científicos y filosóficos*, UNAM, México, 1987.
- Atkins, P.W., *Physical Chemistry*, Oxford University Press, London 1998.
- Bailar-Jones, D., Models, Metaphors and analogies, en: *Philosophy of Science*, Machamer, P. and Silbestein, M. Ed. Blackwell Publishers, Oxford 2002.
- Bruner, J.S., *Towards a Theory of Instruction*, Harvard University Press, Boston 1967.
- Caamaño, A., Modelos híbridos en la enseñanza y el aprendizaje de la química, *Alambique*, 35, 70-81, 2003.
- Claxton, G., *Educación mentes curiosas. El reto de la ciencia en la escuela*, Visor, Madrid, 1994, pág. 159.
- Chamizo, J.A., "Modelo de los 18 electrones" *Cuadernos de la DGPA. Química Inorgánica*, 33-38 UNAM-Porrúa, México, 1991 .
- Chamizo, J.A., "Modelo de ácidos y bases duros y blandos", *Cuadernos de la DGPA. Química Inorgánica*, 57-60 UNAM-Porrúa, México, 1991b.
- Chamizo, J.A., "Modelos del enlace químico, *Elementos*, 2, 28-32, 1992.
- Chamizo, J.A., "Enseñar lo esencial acerca de lo más pequeño", *Revista de la Sociedad Química de México*, 40, 88-94, *Educación Química*, 1996, 7, 7-12, 1996.
- Chamizo, J.A., Hacia una cultura química, *CIENCIA*, 56, abril-junio, 2005.
- Chamizo, J.A., Teaching modern chemistry through 'recurrent historical teaching models', por publicarse en *Science&Education*, 2007.
- Driver, R., Newton, P., Osborne, J., Establishing the Norms of Scientific Argumentation in Classrooms, *Science Education*, 84, 287-312, 2000.
- Erduran, S., Duschl R., Interdisciplinary Characterization of Models and the Nature of Chemical Knowledge in the Classroom, *Studies in Science Education* , 40, 111-144, 2004.
- Galagovsky, L. y Arduriz-Bravo, A., Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales, El concepto de modelo didáctico analógico, *Enseñanza de las ciencias*, 19, 2312-242, 2001.
- Giere, R.N., *Understanding Scientific Reasoning*, Harcourt Brace College Publishers, Forth Worth, 1997.
- Giere, R.N., *Science without laws*, Chicago University Press, Chicago, 1999.
- Gilbert, J.K., Boulter C.J., *Developing Models in Science Educatio* , Kluwer Dordrecht, 2000.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. and Smith, C., Understanding models and their use in science conceptions of middle and high school students and experts, *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 9, 799-822, 1991.
- Guevara, M., Valdez, R., Los modelos en la enseñanza de la química: algunas de sus dificultades asociadas a su enseñanza y a su aprendizaje, *Educación química*, 15, 243-247, 2004.
- Hodson, D., Time for action: science education for an alternative future, *International Journal of Science Education*, 25, 645-670, 2003.
- Hyle 2000, Special Anniversary Issue, Models in Chemistry, vol. 6, number 1.
- IHPST 2005, *Eighth International History, Philosophy, Sociology & Science Teaching Conference, Leeds*.
- Izquierdo, M., Adúriz A., Epistemological Foundations od School Science, *Science Education*, 12, 27-43, 2003.
- Jiménez-Aleixandre, M., Rodrigues, A., y Duschl, R., Doing the Lesson or Doing Science: Argument in High School Genetics, *Science Education*, 84(6), 757-792, 2000.
- Justi, R., Teaching with historical models, en Gilbert J. & Boulter C (eds.) *Developing models in science education*, Kluwer, Dordrecht, 2000.
- Justi, R., Gilbert, J.K. Models and modelling in Chemical Education, *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, Kluwer, 2002a.
- Justi R., Gilbert J.K., Philosophy of chemistry in university chemical education: The case of models and modelling, *Foundations of Chemistry*, 4: 213-240, 2002b.
- Langmuir I., The arrangement of electrons in atoms and molecules, *Journal of the American Chemical Society*, 41, 868-883, 1919.
- Morin, E., *La mente bien ordenada*, Seix Barral, Barcelona, 2002.
- Popper, K., *Objective knowledge*, Oxford University Press, Oxford, 1979.
- Savater, F., *El valor de elegir*, Ariel Barcelona, 2003.
- Sánchez Blanco, G. y Valcárcel, M.V., Los modelos en la enseñanza de la química: concepto de sustancia pura, *Alambique*, 35, 45-52, 2003.
- Suckling, C.J., Suckling, K.E., Suckling, C.W., *Chemistry through models*, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.