

# Modelos Científico-Didácticos.

Importancia en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias.

Cristina Aznarte Mellado



# ÍNDICE:

## **Modelos científico-didácticos.**

*Importancia en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias.*

	Página
Introducción	6
Concepto de modelo	6
Nuestro uso de los modelos	7
Modelos mentales	10
Modelos científico-didácticos	12
1.- El método de construcción	12
2.- Génesis de los modelos científicos	14
3.- El sustrato de conocimientos	20
4.- El nivel de desarrollo mental	20
5.- Evaluación del modelo	22
Teorías sobre el aprendizaje	23
1.- Modelos de aprendizaje	23
2.- Conocimiento cotidiano, escolar y científico	33
Un ejemplo del desarrollo del conocimiento científico: Naturaleza corpuscular de la materia	39
1.- Génesis y desarrollo histórico de la TCM	39
2.- Teorías actuales sobre la naturaleza de la materia	52
Bibliografía	55

# MODELOS CIENTÍFICO-DIDÁCTICOS.

## *Importancia en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias.*

### ^ **INTRODUCCIÓN**

Tanto en las construcciones cognitivas de los individuos, como en las construcciones culturales realizadas a lo largo del tiempo por las sociedades humanas, todo conocimiento del mundo es en realidad conocimiento de distintas series de modelos del mundo. En su desarrollo cultural, el conocimiento científico humano ha producido, sucesiva y alternativamente modelos progresivamente más adecuados para explicar y para permitir la representación de aspectos más y más complejos de la realidad.

En el desarrollo individual, el niño se dedica a la organización, tanto sucesiva como alternativa, de modelos progresivamente más adecuados para representar aspectos específicos y generales de su experiencia del mundo.

Con pautas similares, todo conocimiento individual crece conformado por los hechos de la realidad y por las culturas ambientales, común y científica, que lo rodean, intentando explicar fenómenos naturales a varios niveles de comprensión y expresión; intentando conectarlos entre sí de forma lógica (es decir a semejanza de un modelo) por medio de representaciones complejas; intentando explicar las estructuras internas que se pueden suponer o reconocer a veces en fenómenos y hechos.

### ^ **CONCEPTO DE MODELO**

La misma palabra modelo tiene, una ambigua multiplicidad de significados (Bachelard, 1979). Por un lado puede significar el original, el arquetipo al que nos referimos y que consideramos ejemplar, en este sentido podemos tomar una determinada cosa como modelo para otra que queremos construir; o podemos tomar un determinado proceso o situación emblemático como modelo para otros procesos o situaciones que tratamos de reproducir o de hacer suceder.

Por otra parte, modelo puede significar una esquematización precisa que construimos sobre la base de una multiplicidad de datos de la experiencia que llamamos a veces datos de la realidad, que da lugar a una abstracción satisfactoria de cómo funcionan las cosas.

Modelo puede ser también el prototipo de una clase, a lo que hacemos referencia por medio del lenguaje y de la imaginación para reconocer rasgos similares en objetos, hechos, procesos o situaciones, con el objetivo de agruparlos en la clase identificada por el prototipo.

Por último, con modelo también podemos referirnos a estructuras hipotéticas, probables, de la realidad, e inaccesibles a la evidencia directa, cuyos rasgos se suponen responsables de las correlaciones mutuas entre fenómenos observados.

De todas formas un modelo no es visto como una cosa ni como un objeto con su propia concreción. Un modelo, en su naturaleza de estructura de relación, pertenece a un dominio lingüístico (Bachelard 1979), incluso cuando somos capaces de materializarlo en un objeto; opera de hecho como un filtro intermedio en el que delegamos parte de nuestras funciones de conocimiento. A veces un modelo actúa como una visualización de rasgos

«abstractos», relacionando en un marco espacio-temporal acontecimientos singulares; u organiza en secuencias dinámicas pautas de la realidad que no podemos conseguir sin su ayuda. Pero en ningún caso abarca ni representa todas las características de la realidad a que se refiere.

El objetivo general de un modelo es pues reducir, restringir la cantidad de lo que es aún desconocido en un campo no del todo conocido, y permitir a los elementos de lo que se conoce coagular en una forma determinada y compleja. En todo caso, un modelo es un poderoso instrumento mental, especialmente apto para la comprensión de estructuras de la realidad, cuando su complejidad no nos permite alcanzar y representar directamente sus múltiples relaciones de conexión, y también para lograr un control directo del significado de los hechos.

La actividad cognitiva de modelado tiene lugar en paralelo a la de construcción de esquemas (Arca et al., 1984), capaz de identificar y seleccionar datos de la experiencia de acuerdo con alguna pauta común, consistente con las estructuras de propósito e interpretación.

En esta perspectiva, cualquier actividad de elaboración de modelos discrimina elementos pertinentes, y después los reorganiza en un «todo» esquemático, cuyos rasgos pueden corresponderse con la situación problemática dada o elegida a la que uno se enfrenta. En estos casos, sin embargo, el modelo no actúa como una copia neutral de la realidad, sino más bien como un agente selectivo (filtro y soporte al mismo tiempo) sobre las características de la realidad, preparado para una identificación abstracta y completa de aspectos específicos de la propia realidad.

Pero al mismo tiempo que un modelo aparta la atención (abstrae) de muchas características de la realidad, también aporta a la reconstrucción organizadora muchos rasgos nuevos, que pueden no encontrar correspondencia directa con la realidad a partir de la cual comenzó la actividad de modelado. En este sentido un modelo siempre comporta su propia originalidad, en cuanto añade a la selección esquemática de los hechos observados otros trazos peculiares pertenecientes a su propia naturaleza de modelo. Por tanto las actividades de construcción de modelos siempre llevan a cabo una profunda transformación de la realidad, tanto empobreciéndola por medio de esquematizaciones como enriqueciéndola a través de reconstrucciones adecuadas y el mismo modelo se convierte en un polo activo del proceso cognitivo, estimulando la *búsqueda* y la *explicación* de rasgos concretos de la realidad, no observados previamente, o que parecían irrelevantes (esta dinámica de bucles entre la realidad y sus modelos está bien documentada tanto en la evolución histórica como en el desarrollo individual del conocimiento).

## ▲ **NUESTRO USO DE LOS MODELOS**

La palabra "modelo" tiene una infinidad de acepciones y por esto quizá sea prudente "acotar" aquí su significación: nosotros nos vamos a referir a los modelos, en el sentido de construcciones mentales, "modelos mentales" que utilizamos para comprender la Naturaleza. Los modelos se han utilizado siempre; en la enseñanza el uso de los modelos es tan viejo como la enseñanza misma y tan viejo, por tanto, como la misma Humanidad.

Originariamente, la definición de modelo es la de un sistema figurativo que

reproduce la realidad bajo una forma esquemática, haciéndola de este modo, más comprensible.

Un modelo es pues, una construcción, una estructura, que podemos utilizar como referencia, una imagen analógica que permite materializar una idea o un concepto, para hacerlo así más directamente asimilable.

Las situaciones reales son siempre complejas y extraordinariamente ricas para estudiarlas directamente, por lo que se las reemplaza por un modelo más sencillo de manejar y cuyo comportamiento se aproxima al referente bajo un conjunto de condiciones límites bien definido.

El modelo trata solo una parcela de la realidad, aquella que se pretende estudiar, por lo que constituye un empobrecimiento manejable, sobre el que poder trabajar, soslayando otros aspectos. Por lo que es muy común que existan diferentes modelos sobre el mismo sistema objeto. La coexistencia de distintos modelos que se utilizan en la selección de las propiedades características es posible ya que hay diferentes niveles de jerarquía.

Cuando el libro del **Génesis** nos describe cómo Dios creó al mundo en siete días, en el primero separó la luz de las tinieblas, en el segundo separó las aguas de las tierras secas... etc., nos está mostrando uno de los más antiguos modelos sobre la generación del Universo.

Nuestro actual modelo del **Big-Bang** no es otra cosa que una modernización del antiguo modelo, adaptándolo a nuestros saberes actuales. Así nosotros ahora describimos cómo en el primer segundo se agrupan los quark para formar nucleones.

El uso de los modelos en las Ciencias es más reciente pero tan antiguo como la misma ciencia así el **modelo del viento solar** no es un invento de la NASA, sino de Kepler, que en los años del descubrimiento de América, para explicar la causa de las colas de los cometas, ideó lo que hoy llamaríamos "el modelo del viento solar", que conocemos gracias a la descripción que Newton hace del mismo:

*"Kepler atribuye el ascenso de las colas de los cometas a la atmósfera de sus cabezas, y su dirección hacia las partes opuestas al Sol a la acción de los rayos de luz, que desplazan consigo a la materia de las colas de los cometas"...*

Newton describe este modelo casi un siglo después de su creación con la intención de refutarlo y sustituirlo por el suyo:

*"Pues así como en nuestro aire el humo de un cuerpo calentado asciende,..., en el firmamento, donde todos los cuerpos gravitan hacia el Sol, el humo y el vapor tienen que ascender desde el Sol".*

Pero Newton no era consciente de haber construido lo que así mismo llamaríamos hoy un "modelo atmosférico" del Universo donde los gases emanados de la cabeza caliente del cometa flotan en el éter en dirección contraria al peso. Newton creía estar "describiendo la realidad".

Otro tanto pensamos que ocurre con los profesores en un porcentaje elevado y lo mismo podemos deducir del análisis de textos realizado. Antes, los profesores no advertían a sus alumnos de que estaban usando modelos imaginarios para acercarse a la realidad.

Pero no lo hacían porque, los mismos profesores, no eran conscientes de ello. Esto en los últimos años ha cambiado porque en los diseños curriculares, se señala

expresamente la necesidad de utilizar los modelos como tales, pero la idea no está asumida de forma general entre los profesores de ciencias educados en la “vieja escuela”.

La construcción de modelos es un antiguo recurso, tanto científico como didáctico. Lo novedoso es ser conscientes de su utilización, tomar conciencia de que la realidad y las construcciones mentales que nosotros elaboramos para comprenderla, son dos cosas diferentes. Cada nuevo modelo creado o cada perfeccionamiento de uno anterior no es más que un nuevo intento de acercamiento a esa verdad que la Naturaleza guarda tan celosamente y a la que nos vamos aproximando lenta pero inexorablemente.

Claro que, dada la entidad del ejemplo que hemos elegido, además habrá que convenir en que no siempre el modelo posterior, o el debido al personaje de mayor lustre, es el que nos llevará por el mejor camino.

Así ha ocurrido en las clases de química con el nefasto modelo semicuántico de **Böhr** que hizo creer a todo el mundo que los electrones giran ciertamente dando vueltecitas alrededor del núcleo, y que luego son capaces de dar el salto cuántico, que quizá en este modelo habría que calificar con más propiedad como "salto mágico", ya que el electrón es capaz de saltar de una órbita a otra sin haber estado nunca en ningún lugar intermedio. A la mayoría de estas personas nadie les ha advertido que se trata de una construcción mental, de un invento, de un modelo que hoy sabemos alejadísimo de la realidad.

En definitiva se trata de un modelo con profundos errores conceptuales, que por supuesto eran inevitables en 1913, una época de transición entre los conceptos clásicos y los cuánticos, ¿Pero tiene alguna explicación razonable el que estos errores conceptuales sigan apareciendo en nuestros libros de texto y que nosotros sigamos transmitiéndolos actualmente?

Los modelos cuánticos son necesarios para comprender la estructura electrónica de los átomos justificando su ordenación en el sistema periódico y los enlaces de las moléculas de donde deriva el impresionante desarrollo de la química, así como para explicar las propiedades eléctricas y magnéticas, la naturaleza de los sólidos base de la moderna electrónica.

La dificultad de tratar conceptos asociados a un aparato matemático muy complejo en los niveles de secundaria y bachillerato hace que la enseñanza y el aprendizaje de los conceptos básicos de los modelos cuánticos se presenten en numerosas ocasiones con graves errores conceptuales en algunos aspectos básicos de la física moderna, lo que hace que los alumnos de estos niveles desconozcan el comportamiento dual del electrón y no sean capaces de dar ninguna explicación tanto teórica como experimental contra las orbitas de Borh. Nos estamos refiriendo a errores como por ejemplo, que los orbitales son independientes de los electrones y que por tanto pueden o no estar ocupados por estos, idea de orbital estantería que existe independientemente de los electrones o que los orbitales son los envolventes de las posibles trayectorias del electrón en el átomo.

Estos errores se deben a la dificultad, como hemos comentado antes, de introducir estos conceptos a esos niveles, que lleva con frecuencia a una introducción desestructurada y confusa de los conceptos, mezclando concepciones clásicas, precuánticas y cuánticas acerca de la estructura atómica, y esta yuxtaposición constituye una de las fuentes más importantes de errores conceptuales.

En la mayoría de los casos estas confusiones se deben a la necesidad de presentar de modo sencillo algunos conceptos y fenómenos nuevos sobre los que carecemos de una

previa experiencia sensible y cotidiana, que nos proporcione una intuición o modelo sin tener que usar un bagaje matemático.

Este afán simplificador conduce a utilizar conceptos clásicos para explicar fenómenos que obligaron a abandonar las concepciones clásicas y además se presentan sin dejar de dar como real la imagen clásica.

El uso de los modelos permite presentar de forma esquemática y sencilla lo que de otro modo requeriría una descripción complicada, pero hay que dejar muy claro que se trata de modelos y que todo modelo tiene sus limitaciones y que sólo es útil si se es consciente de ellas. Muchos textos presentan un modelo correspondiente a un típico problema cuántico como la descripción real y correcta del mismo.

Parece pues llegado el momento de tomar claramente conciencia sobre los modelos que utilizamos y realizar un estudio serio sobre sus características, peculiaridades, construcción y utilización. Un estudio que ha dado origen a una nueva rama del saber, la modelística.

En este trabajo vamos a intentar hacer un estudio somero sobre el **origen**, la **construcción** y la **problemática** que plantea la utilización en el aula de estos modelos a los que llamaremos científico-didácticos, un poco en contra de Giordan<sup>1</sup> que los llama "*explicativos*", quizá porque los trata como meros instrumentos didácticos y por consiguiente su valor esencial radica en su poder explicativo. Nosotros admitimos esto pero pensamos que la génesis del modelo está en el propio método científico. Creemos por tanto que es ventajoso arrancar del mismo método científico para comprender mejor el proceso de elaboración del modelo desde su origen hasta su utilización en el aula. Incluiremos por esta razón un apartado sobre el método científico.

## ♣ **MODELOS MENTALES**

Johnson Laird (1980) propone la noción de modelo mental para referirse a una representación que comprendería el mundo denotado por él. Este autor define el modelo mental como un modelo interno del mundo, cuya estructura representa como un espejo sus aspectos relevantes.

La construcción del modelo mental depende tanto de la información recibida como de las interferencias que el sujeto realiza basándose en sus conocimientos. La teoría del modelo mental forma parte de una teoría general del aprendizaje cuyo máximo exponente es Holland (Holland y col., 1986).

Al igual que otras teorías que también provienen del procesamiento de la información, ésta se basa en la idea de que los sistemas cognitivos construyen modelos dinámicos de las situaciones con las que interaccionan, lo que les permite no solo interpretar sino también hacer predicciones a partir de ellas.

Según la teoría de Holland, los conceptos serían modelos mentales formados por reglas activadas simultáneamente en función de las demandas contextuales y de las metas perseguidas. Las reglas se activan cuando su condición es satisfecha por la información activa en la memoria, denominando a este proceso "mensaje". Los mensajes pueden proceder de entradas perceptivas o de los conocimientos almacenados en el propio sistema.

---

<sup>1</sup> ANDRÉ GIORDAN y GERARD DE VECCHI, *Los Orígenes del Saber*, Díada, Sevilla, 1988, Pp. 210.

El aprendizaje de conceptos en esta teoría consiste en la adquisición de nuevas reglas y relaciones entre las reglas ya existentes mediante procesos inductivos guiados por la experiencia (Pozo, 1989). Como teoría de la representación del conocimiento aporta un punto de vista interesante, puesto que parece posible representar muchos de los conocimientos científicos mediante modelos mentales constituidos por sistemas de producción.

Dado el carácter implícito de los modelos mentales, se puede justificar cómo se forman muchos de los conceptos inconscientemente o incluso que dichos modelos mentales sean inaccesibles a la conciencia de la persona que los posee, de manera que si se desea modificarlos es necesario hacerlos emerger a su conciencia. Precisamente el paso de los modelos mentales implícitos a conceptos explícitos sería una de las finalidades de la estrategia de cambio conceptual.

El carácter epistemológico de un modelo viene definido por los siguientes caracteres (Meheut y col., 1988):

a. Carácter autónomo del modelo.

Este carácter autónomo viene determinado por la sintaxis que enuncia las propiedades del modelo. Esta sintaxis descansa sobre la sola coherencia interna y simplicidad de dichas propiedades sintácticas. Confiere al modelo un carácter autónomo que se manifiesta por la existencia de propiedades formales, esto es, propiedades internas al modelo y sin correspondencia en el sistema considerado. Un posible aspecto de dicho carácter autónomo será su carácter figurativo, el cual se atenúa cuando se pasa de modelos materiales a los simbólicos, y a los matemáticos en particular (Walliser, 1977).

b. Carácter teórico del modelo.

El carácter teórico de un modelo viene definido por sus cualidades semánticas en oposición a las relaciones sintácticas descriptivas de su carácter autónomo. La modelización aparece como la relación de dos niveles de descripción de un campo de referencia determinado. Así, por ejemplo, ciertas transformaciones de un sistema gaseoso pueden describirse por un modelo algebraico constituido por una relación entre magnitudes medibles (presión-volumen-temperatura) o por un modelo cinético de partículas. Ambas modelizaciones llamadas empírica y teórica, respectivamente, implican distintos niveles de explicación. La existencia de varios niveles de explicación supone reglas de correspondencia entre los diferentes niveles. Estas reglas, son las que definen sus cualidades semánticas.

c. Dominio de validez.

La validez de un modelo, siguiendo criterios racionales, depende de su coherencia interna y de su simplicidad (cualidades sintácticas) pero también de su poder explicativo y predictivo (cualidades semánticas) (Delattre, 1979; Walliser, 1977, citados por Barboux y col., 1987).

Por tanto, un modelo es tanto mejor cuanto más extenso sea su dominio de validez, es decir, cuando permite explicar, de la forma más simple posible, un conjunto más amplio

de fenómenos.

d. Modelos y realidad.

Como acabamos de mostrar, uno de los aspectos subrayados por la noción de modelo es la pluralidad de los modos de descripción que operan en el conocimiento científico, así como el carácter siempre limitado del conjunto de los fenómenos explicables en el marco de un modelo dado (dominio de validez). Por tanto, se opone a un realismo ingenuo que tiende a una identidad entre la realidad y la ciencia, entre la naturaleza y la razón, así como a un empirismo radical que oculta el papel de la hipótesis y de la información teórica. No obstante, deja abierto el debate entre realistas científicos y operativistas sobre la existencia de una realidad objetiva, independiente del observador. Todo lo más conduce a afirmar que, si esta realidad existe, el conocimiento científico no constituye más que una aproximación progresiva.

## ▲ **MODELOS CIENTÍFICO-DIDÁCTICOS**

Creemos en la construcción de un modelo que explique las causas de ciertos fenómenos y propiedades que se observan en la materia y que al tiempo sea de fácil comprensión para poderlo utilizar en los niveles educativos iniciales y medios. De ahí la forma en que lo llamamos: CIENTÍFICO-DIDÁCTICO.

A la hora de enfrentarnos al trabajo con los alumnos, pensamos adecuado pararnos a plantearnos la pregunta de:

¿Cómo se construye un modelo?

Lamentablemente no hemos podido hallar en la bibliografía grandes cosas, apenas algún consejo orientativo aislado y algunas reflexiones sobre las características que deben reunir los buenos modelos, pero ningún método de elaboración. Lo que ofrecemos a continuación es pues la cosecha de la bibliografía reunida junto con el fruto de nuestra propia reflexión y del camino seguido por nuestro trabajo.

### **1.- El método de construcción**

Aconsejamos partir del modelo científico correspondiente, y si no existe, del más próximo. Nosotros vamos a partir, por ejemplo, del modelo cinético-molecular desarrollado para los gases y lo adaptamos hasta que pudiese explicar también las propiedades de sólidos y líquidos, al nivel de educación secundaria naturalmente.

Este modelo científico de partida habrá que modificarlo cuanto sea necesario hasta que se atenga a dos premisas esenciales:

- a) El substrato de conocimientos de los alumnos a quienes va dirigido,
- b) El nivel de desarrollo mental de los mismos.

Naturalmente estas modificaciones no pueden alterar las interpretaciones científicas contenidas en el modelo originario, sino únicamente simplificarlas.

Este trabajo de adaptación y simplificación es arduo y en ocasiones exige de no poca imaginación y muchas horas de discusión. Es por esto que no puede haber reglas para ello.

El modelo así elaborado deberá someterse a dos tipos de evaluación: una que podríamos llamar "modelística", según la cual, todo modelo para ser útil como tal debe cumplir ciertas reglas, y otra de contrastación en el aula, donde finalmente se comprobará su eficacia.

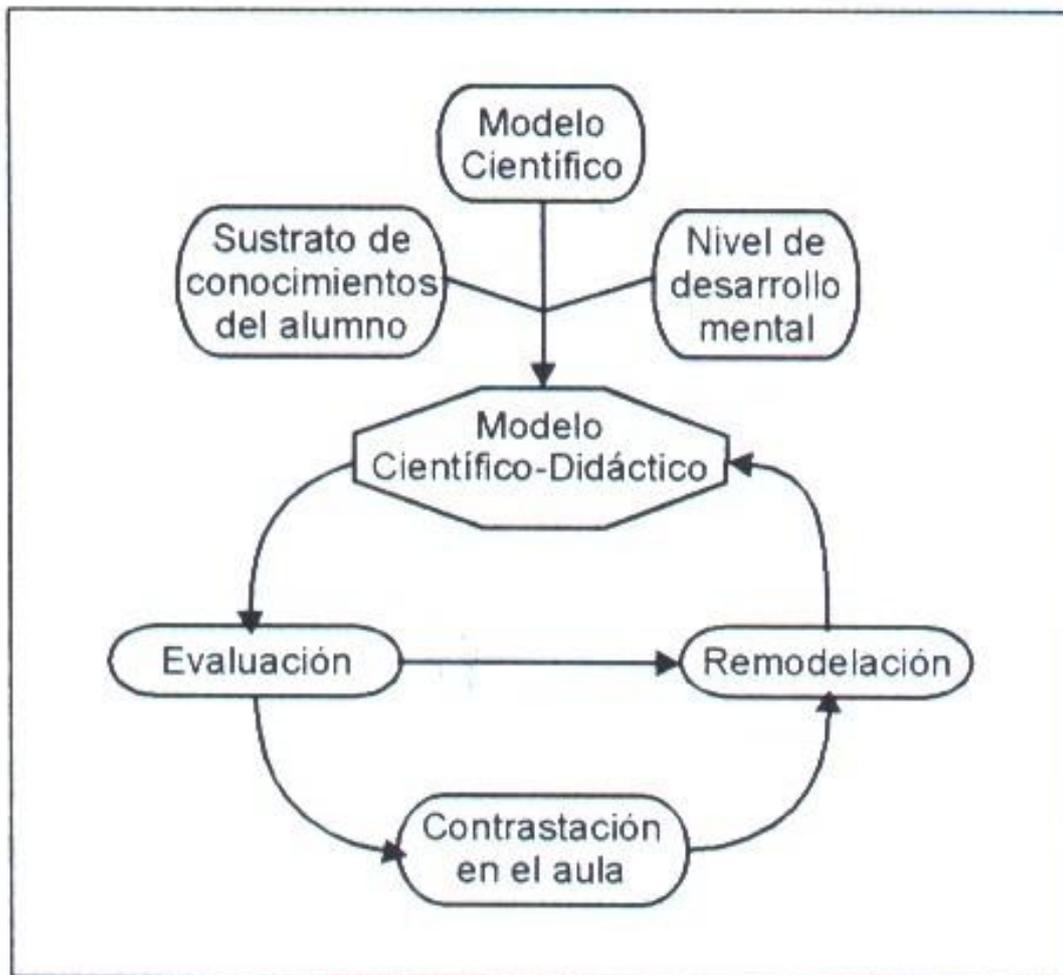


Figura 1. Construcción del modelo Científico-Didáctico

En la figura 1 puede apreciarse en forma esquemática el método general que proponemos y, a continuación, pasaremos a describir cada una de sus partes.

## 2.- Génesis de los modelos científicos

En la construcción del conocimiento científico los modelos se generan por los más diversos caminos. Nosotros pensamos que conocer la forma de gestarse el modelo tiene interés para su posterior adaptación didáctica. Por esta razón vamos a describir someramente estos diversos tipos de gestación. Y para ello lo mejor es hacer una clasificación de los distintos tipos de modelos y a partir de ella describir la génesis de cada uno.

Hay muy pocos autores que se hayan preocupado hasta ahora por clasificar los modelos existentes, pero lo peor es que cada uno lo hace ateniéndose a diferentes criterios. La clasificación que resulta más útil a nuestras intenciones es la de Mario Bunge<sup>2</sup> que transcribimos con ligeros retoques.

<b>Modelo</b>	Teorético	Modelos Inductivos	Icónico
			Simbólico
			Conceptual
	Material	Modelos deductivos o interpretativos	Factual
			Mixto

De esta clasificación los modelos teoréticos son los que acaparan nuestro interés. En ellos se distinguen dos grandes ramas: los modelos **INDUCTIVOS**, que son aquellos que han sido elaborados para deducir a partir de su uso una ley o teoría más general y los **INTERPRETATIVOS** que, en general, pueden considerarse como interpretaciones que se hacen de teorías abstractas. Analizaremos brevemente cada uno de ellos:

### *MODELOS INDUCTIVOS*

#### **Icónico o figurativo:**

Consiste en una imagen que facilita la comprensión de un mecanismo complejo, como la metáfora de la cerradura y la llave, tan usado como modelo de actuación de las enzimas sobre el substrato.

#### **Simbólico:**

El péndulo simple, constituido por una masa puntual pendiente de un hilo inextensible y sin masa que oscila separándose de la vertical un ángulo tal que  $\text{Sen } \alpha = \alpha$ . El estudio de este modelo permite deducir que el período es función de la longitud del hilo y la intensidad del campo gravitatorio "g". La contrastación posterior del postulado con péndulos

<sup>2</sup> MARIO BUNGE, La Investigación Científica, Ariel, Barcelona, 1975. Pp. 456.

reales próximos al modelo elevará a la categoría de ley el postulado. Así se han elaborado muchas leyes de la dinámica. En la ciencia política, el modelo de sociedad democrática.

### MODELOS DEDUCTIVOS O INTERPRETATIVOS

Antes de entrar en la mera descripción y ejemplificación de los mismos habría que hacer unas consideraciones previas para ilustrar cómo estos modelos arrancan de las propias teorías científicas.

El proceso de elaboración del pensamiento científico está reflejado en el método científico que esquematizamos en la figura 2.

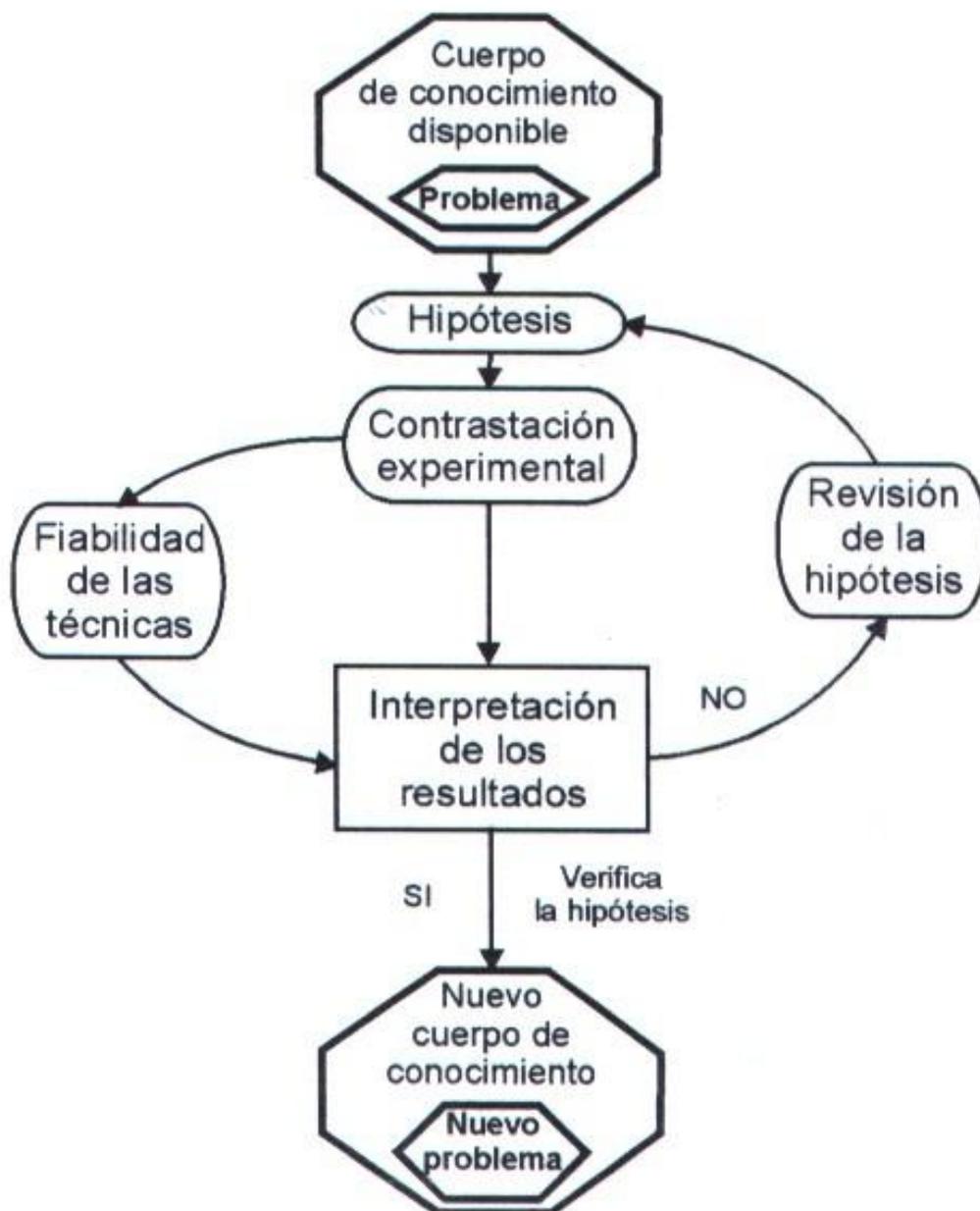


Figura 2. El ciclo del trabajo científico

El ciclo científico no necesita explicaciones por lo sobradamente conocido, no obstante haremos otro esquema más lineal y simplificado para vislumbrar el punto de arranque del modelo.

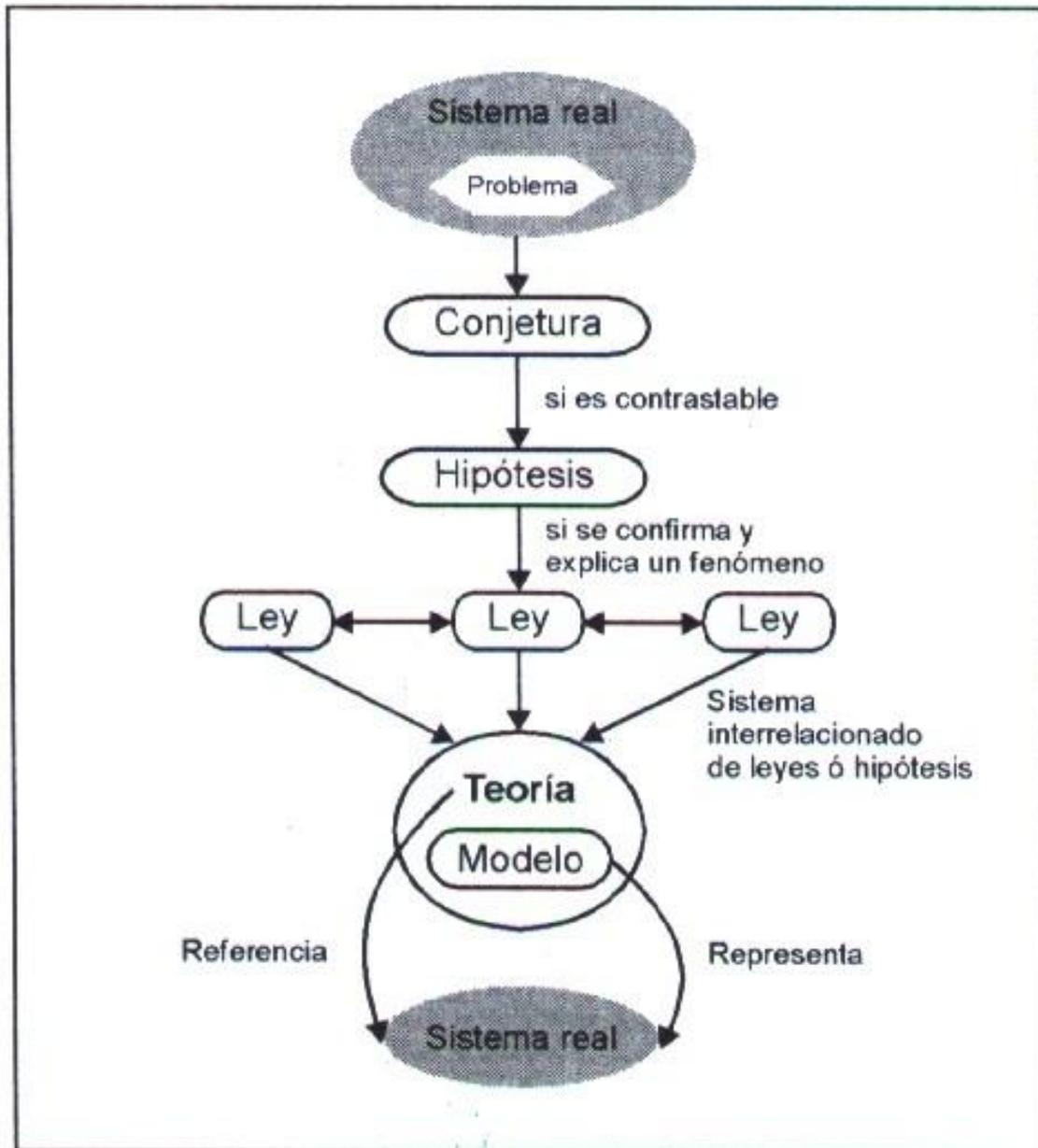


Figura 3. Génesis del modelo

La construcción del pensamiento científico parte del intento de resolver el problema que nos ocupa; por ejemplo: ¿cuál es la estructura de la corteza atómica? El problema se resuelve mediante el invento de una serie de conjeturas, por ejemplo:

- Los electrones giran en órbitas circulares.
- Cada órbita tiene una energía, etc.

- ⚡ Si estas conjeturas son contrastables experimentalmente hablamos de ellas como hipótesis. Las hipótesis son el verdadero centro de nuestra actividad cognoscitiva, no los datos.
- ⚡ Si la hipótesis se confirma -es objetiva- y además explica un determinado fenómeno, le damos la categoría de ley, ley natural, puesto que refleja un determinado comportamiento de la naturaleza.
- ⚡ Una teoría científica es un sistema de hipótesis o leyes que, se supone, dan una explicación aproximada de un sector de la realidad. Es un sistema, es decir, es un cuerpo unitario de ecuaciones relacionadas lógicamente entre sí. Con un carácter hipotético-deductivo<sup>3</sup>. Aunque hay que decir que en la Ciencia nunca se han menospreciado otros métodos como el inductivo<sup>4</sup>, e incluso el analógico.

Dentro de la teoría hemos incluido el modelo porque las teorías no son modelos, sino que incluyen modelos. Se ha dicho<sup>5</sup> que: *"la meta de la Ciencia es la construcción de modelos conceptuales de las estructuras de la Naturaleza con la mayor verdad posible"*.

Pero ¿cuál es la relación entre la teoría y el modelo?  
Creemos que la respuesta puede hacerse así de categórica:

- ***Cada una de las interpretaciones posibles de una teoría es un modelo.***

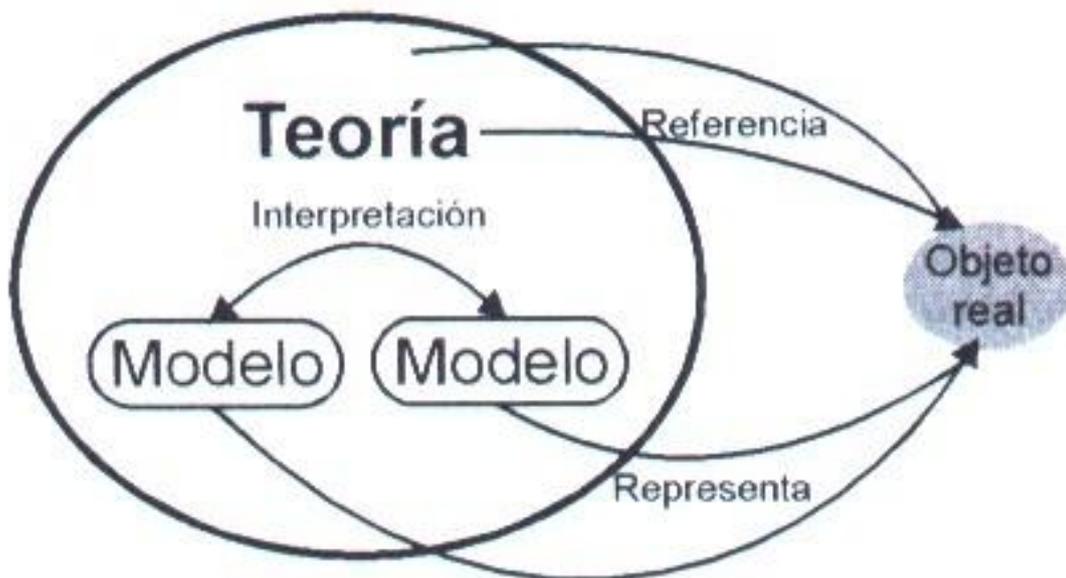


Figura 4. Relación Teoría-Modelo-Objeto

<sup>3</sup> A partir de hipótesis se deducen fenómenos que deberían cumplirse. (Método de Descartes)

<sup>4</sup> De la observación se obtienen conclusiones. (Bacon)

<sup>5</sup> BUNGE, obra citada, pp. 28.

En el esquema de la Figura 4, se indica cómo los modelos "representan" al objeto real, no necesariamente de un modo figurativo o icónico, pero sí al menos de forma que entre el objeto real y el modelo puedan establecerse correlaciones directas, a veces incluso puntuales. La teoría, en cambio, decimos que "referencia" al objeto de estudio ya que hace alusión a su esencia o comportamiento de un modo abstracto o, al menos, de una forma más lejana y genérica. La ejemplificación de los modelos DEDUCTIVOS o INTERPRETATIVOS nos aclararán estos conceptos.

### **Conceptual:**

La *interpretación formal* de una teoría abstracta es un modelo conceptual.

La Geometría de Euclides es un modelo conceptual de la teoría más abstracta, y desarrollada mucho más tarde, de la Geometría Plana. Aunque Euclides<sup>6</sup> no era consciente de estar construyendo un "modelo" de geometría plana, sino que creía estar describiendo la verdadera naturaleza del espacio físico.

### **Factual:**

Las *interpretaciones físicas* de una teoría abstracta son modelos factuales.

Una teoría puede consistir en un conjunto de ecuaciones, por ejemplo: la teoría electromagnética de Maxwell. Pues bien, las interpretaciones que nosotros hacemos de esas ecuaciones, son modelos factuales. Así, por ejemplo:

4ª Ecuación de Maxwell:

$$c^2 \int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{d\theta_E}{dt} + \frac{i}{\epsilon_0}$$

#### Interpretación 1:

*La causa del campo magnético es la corriente eléctrica y/o la variación del flujo del campo eléctrico.* - Modelo factual correspondiente a la ley de Ampère ampliada -

#### Interpretación 2:

*La naturaleza de la luz consiste en campos eléctricos y magnéticos.* - Modelo ondulatorio de la luz -

### **Mixto:**

Son definiciones formales (matemáticas) de una propiedad física que no tiene correlación directa con nada realmente existente. Reúnen por tanto características de los conceptuales y los factuales.

- Tal ocurre con la entropía que no puede considerarse propiamente una propiedad física sino más bien una descripción de la forma en que ocurren las transformaciones termodinámicas.

---

<sup>6</sup> La geometría de Euclides se basa en los conceptos de punto, recta y plano y su postulado fundamental dice que por un punto exterior a una recta pasa una, y sólo una, recta paralela a la dada.

$$S = \int \frac{dQ}{T}$$

- Otro tanto ocurre con el concepto de "circulación" y su aplicación a los campos para deducir si son o no conservativos y otras propiedades como el potencial, o el trabajo.

$$C = \int \vec{c} * \vec{dl}$$

- Y lo mismo con la "función de onda" en la mecánica cuántica.

### Modelo material

A veces un sistema real puede considerarse como "modelo material" de una teoría; así los circuitos eléctricos llamados "calculadores analógicos", que pueden realizar operaciones lógicas como AND, OR, NOT,... que corresponden al cálculo proposicional, y que forman parte de los ordenadores.

O el modelo hidráulico de la economía de una región.

O los modelos de bolas y varillas que usamos para representar átomos y moléculas, como las representaciones del ADN.

El anterior ejemplo de Maxwell lo hemos elegido también con la intención de ilustrar otro aspecto diferencial que existe entre la teoría y el modelo. El modelo ondulatorio de la luz, deducido a partir de la ley mencionada, ha resultado ser falso, mientras que la teoría, la ley, sigue siendo rigurosamente cierta (naturalmente dentro de lo que cabe en la habitual falibilidad de las teorías científicas). Lo que suele fallar es la interpretación, no la teoría.

Esta es una de las causas por las que los investigadores actuales se niegan a hacer modelos interpretativos y prefieren quedarse con el lenguaje abstracto de las ecuaciones, especialmente en física cuántica. Dicho en palabras de Feynman<sup>7</sup>: *"Cuanto mejor se ve cuán extrañamente se comporta la Naturaleza, más difícil es hacer un modelo que explique cómo ocurre realmente el fenómeno más sencillo. En consecuencia, la física teórica ha abandonado el hacerlo"*.

Esta cómoda actitud de los investigadores supone un duro golpe para los profesores que al no disponer de los modelos elaborados tendremos que realizarlos nosotros mismos -si somos capaces- o renunciar a explicar los fenómenos cuánticos a niveles elementales y medios.

Un buen ejemplo de capacidad y valentía en este terreno lo tenemos en el recientemente elaborado modelo titulado *"La Luz: Un Inmenso e Incesante Flujo de Fotones"* de Salvador García Ramírez y otros<sup>8</sup> editado en forma de unidad didáctica para la ESO.

<sup>7</sup> RICHARD P. FEYNMAN, *Electrodinámica Cuántica*, Alianza Universidad, Madrid, 1988. Pp. 87.

<sup>8</sup> LA LUZ: UN INMENSO E INCESANTE FLUJO DE FOTONES. Salvador García Ramírez, Rafael Hoces Prieto, Juan de Dios Jiménez Valladares, Gonzalo Martín Rodríguez, Antonio Reinoso Cobo, Francisco Tarragona Gómez y Ana M<sup>a</sup> Zamora Mantas. *Materiales Curriculares de la ESO. Área de Ciencias de la Naturaleza*. Junta de Andalucía. Sevilla. 1995.

### 3.- El sustrato de conocimientos

Partiendo del modelo científico generalmente hay que seleccionar cuáles son los aspectos que vamos a recoger en nuestro modelo reducido, eliminando el resto con cuidado exquisito para no introducir, o inducir con ello, errores conceptuales.

Esta selección ha de ser coherente con el sustrato de conocimientos de nuestros alumnos de tal modo que situemos siempre el nuevo conocimiento en la "*zona de desarrollo próxima*" de que nos hablaba Vigotsky<sup>9</sup>.

Es imprescindible que los postulados básicos en que se ha de basar nuestro modelo sean plenamente inteligibles para nuestros alumnos, dado su nivel de conocimientos. Después el modelo desarrollado deberá ser lo suficientemente flexible para adaptarse a distintos niveles, admitiendo la adición de complejidades o perfeccionamientos que le permitan explicar nuevos hechos.

No siempre será posible adaptar un modelo científico al nivel de conocimientos de un determinado grupo de alumnos. Pero esto sólo nos estará indicando que este conocimiento no debe introducirse en este nivel sino en otros superiores.

### 4.- Nivel de desarrollo mental

Al mismo tiempo que su nivel de conocimientos habrá que tener muy presente el nivel piagetiano de desarrollo mental de los alumnos a quienes va dirigido. Y desgraciadamente esto, con frecuencia, es un duro escollo difícil de salvar en la enseñanza de las ciencias, en general, y en la modelización en particular.

En el estudio sobre los "niveles cognoscitivos que exigen los currículos de ciencias" realizado por Shayer y Adey<sup>10</sup> en 1981 en la población escolar del Reino Unido, ha quedado perfectamente establecido el grado de utilización y la comprensión de los modelos en función del nivel evolutivo de los alumnos:

- ◆ Para los niveles de pensamiento concreto, el modelo no se utiliza correctamente ya que se toma como una comparación simplificada que guarda una relación absolutamente directa (1:1) con el fenómeno que tratamos de explicar.
- ◆ Solamente en los niveles de pensamiento formal la utilización de los modelos es positiva. En el nivel formal avanzado, es totalmente correcta en todos sus aspectos, pero hay que tener en cuenta que en el nivel formal inicial:
  - El modelo se considera como *algo verdadero* no hipotético.

---

<sup>9</sup> VIGOTSKY, L. S., Aprendizaje y desarrollo intelectual en la edad escolar, en Psicología y Pedagogía, Akal, Madrid, 1934.

<sup>10</sup> MICHAEL SHAYER Y PHILIP ADEY, La Ciencia de enseñar Ciencias, NARCEA, Madrid, 1986.

- No son capaces de hacer una comparación crítica entre varios modelos.
- No suelen utilizar los modelos más que a nivel cualitativo.
- El uso a nivel cuantitativo se limita al caso de pocas variables con relaciones sencillas entre ellas.

A estas consideraciones hay que añadir que, según el mencionado estudio, las edades a que se alcanzan cada uno de los estadios de pensamiento son significativamente más altas que las indicadas por Piaget cuando se toma una muestra suficientemente extensa.

Concretamente en alumnos de 12-14 años nos encontraremos que un 75% de ellos se encuentran todavía en las últimas etapas de pensamiento concreto-avanzado y sólo un 20% se inician en el pensamiento formal.

Entre 14-16 años sólo tendremos un 30% de alumnos en el estadio del formal inicial y tan sólo un 15% en el formal avanzado. El resto, 55%, no habrán llegado a alcanzar el pensamiento formal, imprescindible para la utilización de los modelos.

Porcentajes, estos últimos, que según se apunta en dicha investigación podrían ser los que correspondan a la totalidad de la población adulta, ya que nadie ha podido demostrar hasta el momento que haya cambio evolutivo del pensamiento mas allá de los 16 años.

Como estos estudios corresponden a la población infantil inglesa siempre existe la sospecha de que en nuestro país pudiera darse una distribución de la población juvenil diferente, pero no hay tal. En un estudio realizado por Hierrezuelo y Molina<sup>11</sup> en el año 88, utilizando el mismo test "TAREAS RAZONADAS EN CIENCIAS" de Shayer, Adey y Whillam y aplicándolo a dos Institutos de la provincia de Málaga; Velez-Málaga y Torrox y llegan a la conclusión de que en 2º Curso de BUP:

- 10% Del total dominan las operaciones formales.
- 80% Se encuentran en la transición entre operaciones concretas y el inicio de operaciones formales.
- 10% o más, tienen dificultades con las operaciones concretas.

Aunque la contrastación se realizó a pequeña escala, y en una época ya pasada, su análisis indica claramente que no existen diferencias respecto a los encontrados por Shayer y Adey.

Estos resultados son desalentadores. ¿Acaso no deberíamos usar los modelos más que con estos alumnos que pueden sacar de ellos un rendimiento óptimo?

Hierrezuelo se plantea esta misma cuestión en su trabajo y concluye que "*estos resultados no nos deben llevar a la eliminación de actividades de nivel formal en el*

---

<sup>11</sup> HIERREZUELO MORENO, J. y MOLINA GONZÁLEZ, E., Las tareas razonadas en ciencias, Enseñanza de las Ciencias, 1988, 6(1), pp. 38-41.

*currículum, pero sí a ser conscientes de la dificultad que plantean a los alumnos, debiendo tenerlo en cuenta a la hora de programar los objetivos a conseguir."*

Suscribimos totalmente la idea y sólo añadiríamos que en realidad esta "composición intelectual" del aula la conocemos los profesores desde siempre. Lo que hace dramática la situación es ver esto que siempre hemos sabido, plasmado en cifras y porcentajes contrastados.

A estos factores a tener en cuenta a la hora de construir un modelo podríamos añadir las observaciones del investigador francés Martinand<sup>12</sup> que aconseja estudiar los mecanismos utilizados por los propios alumnos en su modelización espontánea. Nosotros no estamos seguros de que esto pudiera resultar fructífero para la modelización. Hemos realizado un pequeño estudio de campo con alumnos de distintos niveles, y hemos podido constatar, como una característica generalizada en la modelización espontánea de los alumnos; *la falta absoluta de coherencia en los modelos que elaboran, respecto de sus propios conocimientos*. Los alumnos suelen buscar simplemente una semejanza icónica con algún otro hecho que les resulte familiar. No parece que esto nos pueda ayudar mucho en la tarea.

## 5.- Evaluación del modelo

Una vez construido el modelo, y antes de llevarlo a la etapa final de contrastación en el aula, debe someterse a evaluación. Para ello se deben tener presentes algunas características generales que los modelos deberían cumplir. Características que ahora enfocaríamos como criterios de evaluación. El investigador argentino Castro<sup>13</sup> relaciona una serie de ellas que nos han sido muy útiles y que describimos con algunos retoques:

**Coherencia.** El modelo no debe ser contradictorio con las leyes de la ciencia e incluso con los principios básicos universalmente aceptados: los paradigmas actuales.

**Simplicidad.** Un buen modelo debe ser fácil de describir, comprender y aplicar.

**Elasticidad.** El modelo debe permitir la introducción de modificaciones para simplificarlo o complicarlo, aumentando su precisión, sin que esto implique la destrucción de su estructura básica. Ha de poder adaptarse a distintos niveles educativos.

**Eficiencia.** El modelo, además de brindar información, debería permitir establecer correlaciones entre diversos conocimientos, e incluso permitir las predicciones, como puede hacer cualquier teoría. Hemos defendido más arriba que la teoría científica y el modelo están estrechamente interrelacionados, por tanto las cualidades de las teorías científicas las deben esgrimir también los modelos, incluidas las predictivas.

**Formalidad.** A ser posible, los modelos deberían poder enunciarse en forma cuantitativa,

---

<sup>12</sup> MARTINAND, J. L. La enseñanza y aprendizaje de la modelización, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, 1986, 4(1), pp. 45-50.

<sup>13</sup> CASTRO, E. A. El empleo de los modelos en la enseñanza de la química, ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS, 1992, 10(1), pp. 73-79.

además de su forma cualitativa habitual. Naturalmente esto depende del tipo de modelo que hayamos construido, no todos los tipos admiten ser expresados en forma matemática. También depende del nivel educativo al que hayan de ser aplicados, no olvidemos las dificultades interpretativas de que hemos hablado.

Giordan <sup>14</sup> nos dice que: *un buen criterio para medir la eficacia de un modelo, en la construcción del saber científico, es ver que los que lo utilizan, ponen en relación elementos dispersos de sus conocimientos anteriores, y sobre todo comprobar que aparecen nuevas cuestiones que no podrían plantearse antes de la introducción del modelo.* Esto no es más que la propiedad que hemos llamado "eficiencia", y a la que probablemente habría que llamar "eficacia".

## ^ **TEORÍAS SOBRE EL APRENDIZAJE**

Para poder desarrollar la aplicación de los modelos con los estudiantes con los que trabajamos, debemos de plantearnos cuál es la forma de aprender que utilizan, para así poder adaptar nuestro trabajo a sus actitudes.

### **1.- Modelos de aprendizaje.**

Dado que no se dispone de una teoría del aprendizaje mayoritariamente aceptada, desde una perspectiva toulminiana (Toulmin, 1972) es más racional intentar descubrir en cada teoría aquello que aporta, lo que funciona y lo que no, que tratar de identificar *la teoría correcta* que nos solucionará todos los problemas.

Hoy parece claro que mientras que el alumno estudia ciencias organiza sus conocimientos de manera distinta a como estos aparecen formalizados por la propia ciencia y que esta organización es también distinta de la forma en que se han construido los conocimientos a lo largo de la historia de las ciencias; y también es diferente de la construcción espontánea de los conocimientos científicos que realizan los sujetos autónomamente, antes de estar influenciados por los conocimientos científicos escolares.

El movimiento constructivista del aprendizaje (Linn, 1987, Novak, 1988, Driver, 1988, Benlloch, 1984) destaca la búsqueda activa del significado en el individuo que aprende.

Pero la descripción de este proceso varía en función del modelo teórico de referencia (no es lo mismo el constructivismo piagetiano que el ausubeliano o que el de la psicología del procesamiento de la información).

Utilizar en nuestra práctica profesional un modelo u otro puede conducir a explicaciones del resultado del aprendizaje muy diferentes.

En la literatura relativa al aprendizaje de las ciencias se han tomado como referencia algunos modelos con preferencia a otros. Son estos los elaborados por Gagné, Ausubel, Piaget y los provenientes de la psicología del Procesamiento de la Información.

Vamos a describir los elementos más importantes de estos modelos, señalando la necesidad de fundamentar la intervención didáctica en un modelo de aprendizaje y la posible utilidad de cada uno de los diversos modelos para nuestra acción didáctica.

---

<sup>14</sup> ANDRÉ GIORDAN y GERARD DE VECCHI, Los Orígenes del Saber, DIADA, Sevilla, 1988.

Pasaremos ahora a analizar los sucesivos modelos teóricos del aprendizaje, establecidos:

### ✚ El aprendizaje jerárquico

El modelo de Gagné (1965) constituye un intento de estructurar la enseñanza, fundamentándola en una determinada psicología, la conductista, preponderante en aquel momento (Pozo, 1987). Pensamos que muchos de los modelos personales de los profesores comparten los principios generales con el modelo de Gagné: una filosofía de base empírico inductivista, ampliamente aceptada no sólo por los profesores, sino también por el grueso de la sociedad, incluso después de haber sido muy criticada en la bibliografía especializada (Gutierrez, 1987). Y así como se comparte esta filosofía, se comparte también las dificultades que ella comporta. Por eso creemos que es importante analizar el modelo gagnetiano inicial, a pesar de su evolución posterior.

Para el conductismo, el pensamiento y la conducta humana son respuestas más o menos elaboradas a determinados estímulos, a base de encadenamientos de impulsos nerviosos controlados por el sistema nervioso central. La organización de determinados impulsos va produciendo elaboraciones progresivamente más complejas que pasarán de la simple concatenación de estímulos-respuestas, a la elaboración de asociaciones múltiples o formación de conceptos, dando lugar a aprendizajes de categoría cada vez más elevada.

Así, pues, los conocimientos estarían organizados en jerarquías que van desde el bajo nivel de las reacciones poco específicas ante algunas señales, hasta los niveles más elevados (aprendizaje de conceptos, de principios, resolución de problemas...) pasando por niveles intermedios.

Para conseguir un aprendizaje determinado el profesor necesita saber la situación de partida (los requisitos previos del aprendizaje). Gagné dedica la parte central de su análisis a establecer éstos requisitos: para aprender a resolver determinados problemas pongamos por caso es necesario disponer de los conocimientos inferiores de la jerarquía y del dominio de los principios implicados; para asegurar éste dominio harán falta otros conceptos pertinentes. Y así, sucesivamente, se puede ir estableciendo la jerarquía de aprendizaje para un conocimiento determinado.

Más concretamente, Gagné defiende que debe empezarse por la formulación de los objetivos del aprendizaje en términos de conductas finales. A continuación, se determinan sus requisitos previos a partir de la pregunta *¿qué tendría que ser capaz de hacer el individuo para poder realizar con éxito esta tarea, supuesto que sólo se le van a dar instrucciones?* (Gagné, 1962). La aplicación sucesiva, descendente, de este método, dará lugar a la jerarquía de aprendizaje adecuada, en principio, al contenido propuesto; la secuenciación didáctica seguiría la jerarquía en sentido ascendente.

La teoría de Gagné no ha obtenido resultados muy satisfactorios, ya que la validación experimental de las jerarquías se ha conseguido sólo en unos pocos casos (Gones y Russell, 1979). Para entender sus dificultades, fijémonos en la pregunta de Gagné: *¿qué hay que saber hacer?* Por una parte, *saber hacer* no quiere decir lo mismo que *haber entendido*; si nos proponemos objetivos de conducta puede ocurrir que se aprendan contenidos sin significado, y por otra, los requisitos previos que resultan de contestar la pregunta suele ser de tipo lógico, siguiendo la estructuración formalizada de la ciencia a la que pertenece el contenido que se enseña, porque no se cuenta con la información que lleve al establecimiento de las condiciones psicológicas del aprendizaje.

Por tanto, si nos tiene que resultar útil, este modelo necesita adecuarse a los esquemas interpretativos de los sujetos mediante una reconstrucción intelectual. Es

importante descubrir los requisitos lógicos previos que tienen que funcionar en un aprendizaje; y es importante, también, el aspecto práctico de los conocimientos. Pero unos y otros tienen que encontrar sentido dentro de una perspectiva más global que tendremos que buscar en otros modelos.

La influencia de la teoría piagetiana (Piaget, 1970) para la enseñanza de las ciencias data de finales de los años cincuenta, cuando el conductivismo comienza a cederle el paso.

Si éste otorga al sujeto un papel bastante pasivo, Piaget lo imagina en cambio adaptándose a las circunstancias cambiantes del ambiente, a base de dos procesos: asimilación y acomodación. El individuo capta la realidad utilizando los esquemas u operaciones mentales disponibles, si la encuentra adecuada (asimilación); pero si *estos* recursos mentales no son los adecuados, habrá que modificarlos hasta que puedan encajar con los hechos (acomodación). De esta manera la realidad se adecua a los esquemas interpretativos del sujeto mediante una reconstrucción intelectual. Los casos de construcción de la realidad estudiados por Piaget son numerosos, desde la conservación de los objetos hasta la adquisición de las estructuras del pensamiento formal.

Dentro del modelo piagetiano, a todos estos elementos mentales que realizan la función adaptativa de dotar de significado a la experiencia (aspecto funcional) no se les considera solamente yuxtapuestos, sino que establecen unas relaciones mutuas, con determinadas organizaciones que irían apareciendo de manera escalonada durante el desarrollo (aspecto estructural). Estas estructuras, que para Piaget podrán expresarse en términos de lógica formal, tendrían que ser independiente de los contenidos.

Recordemos que el propósito de Piaget es epistemológico y no psicológico ni, aún menos, pedagógico. Por esto no nos tiene que extrañar que, por ahora, el modelo de Piaget no conduzca de una manera unívoca a una teoría del aprendizaje. Esto supone que ha habido que elaborar expresamente su adaptación a las circunstancias escolares. Para hacerlo hay dos cuestiones a considerar (Marro, 1983): la primera, si es suficiente extrapolar simplemente las afirmaciones de la teoría al contexto escolar, dándoles prioridad sobre las consideraciones pedagógicas, o bien procurando satisfacerlas todas simultáneamente; la segunda, si se pone el acento en los aspectos funcionales o en los estructurales de la teoría.

En cuanto a la primera cuestión y teniendo en cuenta la imposibilidad de formalizar todos los aspectos de la vida pedagógica, parece razonable evitar la extrapolación y tener en cuenta todos los aspectos didácticos, incluso los no contemplados en la teoría, como es, por ejemplo, la variabilidad intelectual. Respecto de la segunda cuestión, y en vista de las dificultades que han surgido al querer explicar la coherencia, de las estructuras mentales en términos de lógica formal (una vez más, la sola fuerza de la lógica no resulta convincente) nos inclinaremos a favor de los aprendizajes funcionales aunque los estructurales como reclaman Shayer y Adey (1981) no puedan descartarse. (Hay que notar que, en los aspectos funcionales, la teoría piagetiana está próxima a la postura toulminiana, mientras que en los estructurales -que son, quizás, los más conocidos- se aleja de ella y es criticada por el mismo Toulmin (1972) por su pretensión de organizar los elementos mentales simplemente como estructura lógica).

Los modelos didácticos surgidos de la epistemología genética piagetiana no acaban de explicar el papel de los contenidos de la enseñanza ni el del contexto en el cual ésta se produce. La transferencia de los conocimientos, según este modelo, tendría que ser mayor que la que encontramos en la práctica (Driver, 1979).

Son éstos aspectos los que habría que cubrir mediante otros modelos, mientras que las aportaciones piagetianas que nos pueden resultar más útiles son: la misma

epistemología - tan diferente de la usual - en primer lugar, especialmente lo que se refiere a la manipulación del conocimiento a base de esquemas u operaciones (conocimiento procesual); y, en otro plano, los aspectos estructurales, quizás más en el nivel descriptivo que en el normativo. De todas maneras es capital entender el sentido de la epistemología piagetiana para utilizar adecuadamente cualquier parte de su teoría.

### ✚ El aprendizaje receptivo

Ausubel (1968) critica el modelo de Gagné por subordinarse a la lógica y el de Piaget por no dar suficiente importancia a los contenidos. Establece entonces su modelo explícitamente educativo centrándose en los contenidos a enseñar y en su estructuración psicológica, que tiene que resultar diferente de la puramente lógica.

Para Ausubel los conocimientos de una persona están organizados en una *estructuración cognitiva* formada por conceptos y *sus* relaciones. Un concepto tendrá significado para un individuo si forma parte de su propia estructura cognitiva. *Tener significado* consistiría pues en poder relacionar un contenido con parte de la estructura cognitiva, de una manera intencionada y substancial, no arbitraria. A un aprendizaje que cumple esta condición lo denomina precisamente *significativo*, mientras que en caso contrario el aprendizaje sería solamente *memorístico*. Aunque los conocimientos memorísticos son necesarios porque cumplen unas determinadas funciones, para la enseñanza de las ciencias nos interesa mucho más saber la manera de conseguir aprendizajes significativos.

Ausubel considera el grado de actividad física durante un aprendizaje (que lo caracterizará como aprendizaje por descubrimiento o aprendizaje receptivo) y el de significación (según el cual será significativo o memorístico) como dos variables distintas.

Con ello critica el aprendizaje por descubrimiento, por considerar que no conduce necesariamente a un aprendizaje significativo y se centra principalmente en el estudio de los aprendizajes significativos por vía receptiva, que para él no es una vía *pasiva* sino que requiere actividad mental.

Ausubel considera que en la estructura cognitiva no todos los conceptos tienen la misma importancia, variando desde los de nivel más alto (los más abstractos e inclusivos), hasta los de nivel más bajo (concretos, subordinados), estableciéndose una jerarquización con todos ellos. Propone un recurso como instrumento que ayude a conseguir el aprendizaje significativo. Se trata del *organizador previo*: una idea de nivel superior al material que se trata de aprender, pero que puede enlazarse con la estructura cognoscitiva y servir, por ello, de anclaje a los nuevos conceptos, dotándoles así de significación. Tanto si se utilizan organizadores previos como si no se hace, se sugiere una secuenciación descendente de los conceptos cuando llega el momento de enseñarlos, empezando por los más generales, puesto que son los que tienen más posibilidades de adaptarse a las características individuales de cada estructura cognitiva. Esto implica, naturalmente, que esta estructura es conocida por el maestro.

La teoría ausubeliana ha decepcionado, en la práctica, muchas de las expectativas que había despertado. Por una parte, los organizadores previos han permanecido sin concretar, difíciles de construir y de distinguir de otros conceptos similares, como por ejemplo, la introducción aun tema. Por otra parte, los conocimientos previos se han revelado mucho más estables y difíciles de transformar que la que el modelo de Ausubel sugiere, mostrándose éste incapaz de explicar el cambio conceptual, que es un proceso de reestructuración mucho más profundo que los cambios que describe Ausubel: la diferenciación progresiva, la reconciliación integradora, etc. (Driver, 1982).

Desde el punto de vista epistemológico, la teoría ausubeliana contiene aspectos inductivistas y empiristas. En este terreno, la *teoría del aprendizaje significativo* de Ausubel es similar al punto de vista conductista habitual, según el cual los conceptos existen en el mundo externo separadamente del sujeto y por la tanto van a él desde fuera.

Por ejemplo, la utilización de los términos *preconceptos* o *ideas preconcebidas* tal como los maneja Ausubel, parece negar a estos conocimientos la categoría de carácter conceptual, cuando en realidad sirven para dotar de significación a la experiencia, aunque sea de manera más o menos alejada de la establecida en cada momento por la ciencia. Por esto, en el contexto ausubeliano, los errores adquieren el carácter de equivocaciones que hay que corregir, más que de puntos de partida para la comprensión gradual de los conceptos aceptados por los científicos.

Aquello que debería ser una estructura cognitiva organizada psicológicamente se ha convertido, en la práctica, en la misma estructura lógica formal de la disciplina. Al menos ésta era, en un momento determinado, la posición de un ausubeliano tan autorizado como Novak (1977), que llegó a representar unas estructuras cognitivas ausubelianas de manera idéntica a las jerarquías gagnetianas, o a hablar de isomorfismo entre la estructura conceptual de la disciplina y la estructura cognitiva de los estudiantes. De nuevo se concede a la lógica el poder absoluto de convencimiento y de significación, ocupando así el lugar de otros criterios racionales que más que estos otros enriquecerían el panorama.

Es cierto que Ausubel ha subrayado la importancia fundamental del contenido previo, en el aprendizaje. Es cierto también que introduce una condición tan importante para los aprendizajes como lo es la significación; y que empieza a dar pistas sobre cómo conseguirlos, dando lugar a un importante movimiento de estudio. Pero, desgraciadamente, en la práctica no han quedado bien establecidas las condiciones que garanticen la significación del aprendizaje. La teoría vacila sobre todo cuando se encuentra ante cambios conceptuales profundos que impliquen cambios radicales de significación.

La teoría de Ausubel nos será útil, no obstante, en aquellos momentos en que la reorganización de la estructura cognitiva no tenga que ser tenida en cuenta, es decir, cuando se trate de *saber el qué* de las cosas (conocimiento declarativo) (Otero, 1985), es decir, de introducir nuevos conocimientos que encajen fácilmente, sin conflictos, en los anteriores, procurando establecer suficientes relaciones entre los nuevos contenidos y los contenidos previos, y entre los conceptos más inclusivos y los que los son menos.

Cuando haya que manipular conocimientos, cuando se trate de saber el cómo de las cosas (conocimiento procesual), resultarán más útiles las operaciones piagetianas. Considerar el conocimiento únicamente como declarativo, sin los aspectos procesuales, lo convierten en estático, dogmático, inadaptable a posibles modificaciones; mientras que hacerlo al contrario (considerar sólo los aspectos procesuales sin los declarativos) lo hacen vacío, no significativo. En este sentido, una y otra teoría son más complementarias que excluyentes.

### **Psicología del procesamiento de la información**

La psicología del procesamiento de la información ha aparecido con fuerza en el campo de la didáctica de las ciencias, como teoría alternativa a las anteriores y con la voluntad de integrarlas.

En sus formulaciones más usuales, el modelo de procesamiento de la información considera que el sistema cognitivo dispone de entradas y salidas de señales desde el ambiente y hacia él. En este modelo son especialmente importantes los conceptos de

*memoria a corto plazo* (MCP), que manipula informaciones procedentes tanto de los sentidos como de la *memoria a largo plazo*, (MLP), de capacidad prácticamente ilimitada, que es donde se almacenan los conocimientos, tanto declarativos como procesuales.

Así, según este modelo, en la resolución de un problema intervendrían una sucesión de representaciones (Larkin y Rainard, 1984) o esquemas de determinadas informaciones.

Un problema de dinámica se representaría primeramente en la MCP con las palabras del enunciado (representación lingüística). Entonces esta representación se trabaja en la memoria hasta que se llega a construir una idea respecto al problema que se nos ha enunciado y sobre qué es lo que se nos pregunta (representación básica). La descodificación de esta representación en términos científicos (como fuerza, masa, energía, etc.) daría una nueva representación de la misma situación (representación científica), que lleva a la solución del problema.

La memoria a corto plazo es limitada y este hecho tiene unas consecuencias educativas directas, como por ejemplo, empezar a estudiar un problema cualitativamente familiar, diseñar experiencias de laboratorio que destaque el fenómeno a estudiar y simplifiquen los problemas secundarios, utilizar sólo un mínimo de teoría y a medida que vaya haciéndose necesario (Johnstone, 1984), etc.

Los primeros modelos de procesamiento de la información de Lindsay y Norman (1977) son muy distintos de los que elaboran actualmente desde la teoría de esquemas (Minski, Anderson). En la actualidad se han señalado diferencias importantes entre un procesador de la información vivo y uno inanimado, como lo sería el ordenador que se erige aquí como modelo de la mente. (De Vega, 1985). Mientras el primero debe someter sus procesos cognitivos a las necesidades vitales, para asegurar la supervivencia, el segundo no los tiene que tener en cuenta. Esto hace que aspectos que sabemos que son tan importantes para el aprendizaje como son los afectivos, queden al margen. Captaremos aún mejor esta diversidad de las variantes que se incluyen en este apartado si observamos que investigadores procedentes de todos los demás modelos han acudido a este campo de investigación: gagnetianos, e incluso el mismo Gagné (Gagné White, 1978), piagetianos, como Case (1980), o ausubelianos, como Osborne y Wittreck (1983-1985).

Todo ello ha cristalizado en un modelo poco concreto, pero que permite unas sugerencias didácticas interesantes desde las que se aspira a unificar y superar a los otros modelos (Stewart, 1985). La ciencia cognitiva ofrece en estos momentos una dispersión metodológica y terminológica demasiado grande y una concreción didáctica demasiado pequeña como para convertirse en el modelo unificador que todo el mundo espera.

Los modelos que acabamos de ver pueden considerarse diferentes aproximaciones para conseguir la significación del aprendizaje. Todos ellos contienen elementos valiosos. Cada uno de ellos puede contribuir, en cuestiones específicas, a hacernos entender los procesos de aprendizaje y a mejorar nuestras intervenciones didácticas.

Quizás no ha sido posible inclinarse por una sola teoría porque ellas no son lo suficiente parecidas funcionalmente para poder ser comparadas (Toulmin, 1972). Esto, en lugar de hacernos sentir incómodos, debe estimular la investigación, dirigida a la superación de las contradicciones existentes. En estos momentos no tendría sentido que en nuestra práctica docente nos encerráramos en un solo modelo: si hacerlo así significa que nos vemos privados de aclarar aspectos concretos de nuestro trabajo, ésta no sería una decisión racional. Lo racional sería una utilización estratégica de todos ellos dependiendo

del tipo de aprendizaje que estemos trabajando.

De todas maneras, no olvidemos que estos modelos psicológicos están doblemente limitados. Por una parte, pasan por alto la cuestión afectiva; precisamente la psicología psicoanalítica, que es la que tiene más en cuenta la afectividad, no ha aportado mucho a nuestro terreno y parece no tener cabida en la tentativa unificadora que la ciencia cognitiva protagoniza. Y por otro lado tenemos que admitir el reproche que Toulmin (1972) hace de la psicología, en su pretensión de explicar la construcción del conocimiento como un proceso individual, ya que éste es, fundamentalmente, una tarea comunitaria. Coll (1986) señala las posibilidades de los nuevos enfoques pedagógicos en esta dirección.

Según Isabel Brincones (1995) podemos resumir lo aportado por las distintas teorías en unas ideas claves y sencillas.

Llegar desde la teoría a ver como se monta una clase es algo distinto y difícil pero eso es básicamente lo que al profesor de a pie le preocupa por ello más que seguir profundizando en las distintas teorías del aprendizaje nos vamos a cuestionar de forma sencilla

¿Qué entendemos por aprender?

¿Cuándo decidimos qué un alumno sabe algo concreto? por ejemplo el principio de conservación de la energía.

Podemos decir muchas cosas cuando nos hacen esa pregunta directamente. Si queremos saber nuestra verdadera concepción de qué entendemos por conocer un contenido debemos ir a un análisis indirecto de qué instrumentos utilizamos para saber si un alumno sabe el principio de conservación de la energía.

En estos momentos parece claro que ningún profesor supondría que un alumno entiende el principio de conservación por el solo hecho de enunciarlo. Nadie haría esa pregunta porque hacerlo supondría que el niño era capaz de repetir lo dicho antes, como mínimo le pediríamos que lo dijera con sus palabras, lo que podría hacernos pensar que lo ha entendido, aunque puede no ser así y que lo haya memorizado con sus palabras.

Estaremos más convencidos que se sabe el principio de conservación, si sabe usarlo por ejemplo resolviendo un problema.

Si en clase explicamos un problema del tipo “lanzamos un cuerpo hacia arriba” calculando la altura a la que llega y esperamos que sepa resolver otro problema similar .

Pero ¡ojo! si el día del examen pedimos un problema similar puede memorizarlo, por lo que podríamos pedirle que aplique el principio de conservación en un problema distinto, como subir un cuerpo por un plano inclinado (una nueva situación con algo diferente).

Un sistema totalmente diferente sería aplicar el principio al caso de poner dos cuerpos en contacto a distinta temperatura y hacer el balance energético de cesión de energía del cuerpo caliente al frío.

Pero eso es un salto demasiado grande explicarle a un alumno el principio de conservación en mecánica y pedirle que lo aplique en calorimetría; Otra forma sería pedirle que aplique esos conocimientos en una reacción química cuando hacemos el balance energético. También estamos aplicando el principio de conservación de la energía.

Hay distintos grados de dificultad al aplicar un mismo contenido en diferentes situaciones.

Decidir qué tipo de salto hay que dar desde la situación inicial en que lo explicamos y la situación final en la que le pedimos que lo interprete el alumno es algo que depende del nivel.

No es lo mismo enseñar esto en 1º de E.S.O., 3º de E.S.O. o en bachillerato.

El mismo concepto se trata en estos niveles, pero con distinta profundidad.

Hay diferentes grados de dificultad, pero lo mínimo que le podemos pedir a un aprendizaje es que el alumno ante una nueva situación sea capaz de adquirirla, (no todos la adquieren), retenerla (suficiente tiempo) y recuperarla pero no de forma repetitiva sino para usarla en situaciones problemáticas.

Esto es una de las características de lo que llamamos aprendizaje significativo.

La diferencia que hay entre la situación inicial y la situación de recuperación o utilización depende del curso que se trate, pero siempre debe haber una diferencia entre esas dos situaciones.

Podemos contestar ya a la primera pregunta que nos hicimos.

¿Qué es aprender?

Recibir una nueva información.

Retenerla.

Almacenarla.

Recuperarla para poder usarla en situaciones nuevas.

¿Cómo se aprende según la teoría del aprendizaje?

Como acabamos de ver en el apartado anterior no hay una sola Teoría de aprendizaje.

Por lo que aquí recogeremos algunas ideas generales que la mayoría de las teorías aceptarían al menos en un 90%.

#### Desarrollo de alguna de estas ideas:

##### ✦ **Primera idea.**

*El aprendizaje significativo tiene que ver con la forma de almacenar la información y no con la forma de recibirla.*

Esta es la novedad correspondiente a la psicología cognitiva.

Los psicólogos conductistas interpretaban la mente como una caja negra de tal manera que había un estímulo se recibía una información y automáticamente se daba una respuesta y en medio entre el estímulo y la información no había nada.

La mente es como una hoja en blanco donde se escribe la información que viene del exterior.

La revolución en psicología aparece en los años 30-50 donde se empieza a pensar que entre lo que se recibe y lo que se aprende hay una diferencia sustancial. Cada uno de nosotros va a interpretar lo que estamos diciendo ahora de distinta forma dependiendo de los conocimientos anteriores, para unos una cosa será interesante y le prestará atención, mientras que para otros, lo mismo, le parecerá superfluo y lo obviará. En función de que una cosa pueda parecer interesante o superflua, algo que depende de la personalidad de cada uno, de lo que a uno le satisface, de sus intenciones, de sus necesidades, pero esto pasa en todas las situaciones de la vida.

Si os cuento como es mi casa, cada uno lo interpretareis de distinta forma dependiendo de la idea que tengáis de mi, diciendo yo lo mismo, unos pensareis que mi casa está bien y otros que no.

Todos recibimos información pero lo que nos queda a cada uno es distinto porque depende de nuestras concepciones previas.

Se habla mucho de ideas previas pero desde el punto de vista de ideas erróneas, pero no solo esas ideas influyen en el aprendizaje sino que afecta todo conocimiento anterior al momento en que se está produciendo el aprendizaje.

⚡ **Segunda idea.**

*La esencia del aprendizaje significativo es el establecimiento de conexiones no arbitrarias entre las nuevas ideas y las existentes en la estructura cognitiva del que aprende.*

Si hay una diferencia entre lo que recibimos y lo que al final nos queda es que algo ha habido en el camino. A eso lo llamamos el sistema de procesamiento de la información.

Todos tenemos el mismo sistema de procesamiento.

¿Esto significa que todos somos igual de listos? No.

Significa, que todos tenemos el mismo sistema, el mismo mecanismo, pero lo podemos usar de distinta manera, el problema es si podemos adiestrarlo para usarlo todos con la misma potencialidad.

¿Cuáles son esos mecanismos?

Haciendo una gran simplificación diremos: Los estímulos, la nueva información, la recibimos por los sentidos (la oímos, la leemos, la vemos...) pero eso no llega así a nuestra mente, para que llegue a nuestra mente, hay que hacer un acto de atención.

En un momento determinado estamos recibiendo muchas cosas por los sentidos de las que somos conscientes (un ruido, los coches, un cartel con imágenes, alguien que habla...) pero no todo pasa a mi mente (los psicólogos llaman memoria a lo que nosotros llamamos mente, cabeza, razonamiento).

Cuando nosotros prestamos atención a una de esas cosas, esa pasa a nuestra memoria, que es muy compleja, tiene una especie de almacén a corto plazo, de la que posteriormente se pasa a otro almacén, más profundo si se establecen relaciones con otros conocimientos, y si no, no se archiva y se olvida. A veces les contamos a nuestros alumnos cosas que no sabe a qué vienen, no saben con que relacionarlas, un día le explicamos un concepto, una fórmula, unas ecuaciones, otro día otra fórmula, otro nombre, otra definición, pero quizás no le insistamos, ni ellos se plantean qué relación hay entre unas y otras.

⚡ **Tercera idea.**

*Hay que establecer relaciones. Antes de recibir una información es imprescindible que los alumnos sepan donde encajarla donde situarla.*

Para recordar un texto la clave es formarse una idea general del mismo. No es fácil, porque este texto es muy abstracto.

Esa idea debemos obtenerla de nuestro bagaje conceptual de conocimientos previos. Esta es la idea central del aprendizaje significativo " lo que aprendemos es el producto de la información nueva interpretada a la luz de lo que ya sabemos".

Igual ocurre con los alumnos cuando se les explica ellos lo interpretan en función de sus conocimientos anteriores (idea inclusora) que interactúan con la nueva información para darle significado.

Por otro lado, no solo debemos dar a nuestros alumnos conexiones, sino enseñarlos a buscarlas. Si no las encuentran que las establezcan por su cuenta.

Tenemos que enseñarlos a procesar la información, estrategias de manejo de la información. Ver las partes de la información, conectarlas entre sí y con lo que ya saben.

#### ⚡ **Cuarta idea.**

*" Lo que aprendemos es el producto de la información nueva interpretada a la luz de lo que ya sabemos"*

Esto es el constructivismo; Construir el conocimiento, establecer relaciones entre la nueva información y lo que ya se sabe en situaciones adecuadas.

Esta es la clave: las situaciones adecuadas.

Todos estamos en contacto con la realidad luego todos deberíamos sacar las mismas conclusiones, pero no basta con la información, veamos a qué nos referimos con las situaciones adecuadas.

Intentaremos contestar ¿qué es lo que tiene que construir?

Tenemos que lograr, que si tiene una estructura cognitiva, después de pasar por un proceso de formación, aumenten las conexiones de la estructura cognitiva.

Y esto ¿qué tiene que ver con cómo nos planteamos las clases?

Está relacionado por dos cuestiones:

a) El crecimiento de la estructura cognitiva tiene que ver con el establecimiento de relaciones entre lo nuevo y lo que ya se sabe y eso tiene que ver fundamentalmente con la selección de contenidos.

b) El establecimiento de conexiones entre las partes tiene que ver con la secuenciación de contenidos.

La expresión constructivismo está relacionada con la metodología del cambio conceptual, pero el constructivismo es algo más es construir el conocimiento, aunque no se tengan ideas erróneas sobre un tema hay que trabajar sobre lo que ya se sabe. Esto podría resumirse en una frase de Ausubel:

#### **"Conocer lo que saben vuestros alumnos y obrar en consecuencia"**

Lo más importante como resumen de toda la psicología del conocimiento no es lo que quiero enseñar, sino lo que ya saben y como construyo sobre lo que ya saben.

Es importante cambiar las ideas erróneas, pero siempre partiendo de lo que ya saben.

Piaget, fue de los primeros en hablar de que el alumno interacciona con el medio y de que de esa interacción se va a construir el conocimiento.

El medio actúa sobre el individuo modificando sus esquemas de conocimiento. Se aprende así fuera y dentro de clase aunque se suele compartimentar la enseñanza. Por eso decimos que el sujeto aprende descubriendo pero en contacto con algo (el medio) así aprendemos todos el conocimiento del mundo, vemos como reaccionan las personas, como actúan y podemos prever como actuará en otra situación, así aprendemos el comportamiento de la naturaleza pero no aprendemos así en clase. De todo lo anterior, podríamos deducir que habría que estar siempre en el laboratorio, para así estar en contacto con el medio, pero eso no siempre es cierto, porque hay necesidad de abstracción.

Hay mucho conocimiento científico que se construye a partir de lo que el sujeto ve en contacto con el medio físico pero haciendo una abstracción. Si solo fuera en contacto con el medio físico no se podrían establecer teorías. Esos actos de abstracción son los que permiten adquirir destrezas de aprendizaje, estrategias cognitivas. Se crean destrezas y estrategias usándolas.

El problema es la paradoja del aprendizaje. Si resulta que tengo que enriquecerme de estrategias de razonamiento y las estrategias de razonamiento son a su vez las que tengo que usar para adquirir conocimiento y que ese conocimiento me proporcione más estrategias de razonamiento, es como un círculo vicioso.

Si no se razona no puedo actuar sobre el medio con lo cual no puedo aumentar mi estructura bien.

## **2.- Conocimiento cotidiano, conocimiento escolar y conocimiento científico.**

Toda investigación en el ámbito de la enseñanza se lleva a cabo explícita o implícitamente, dentro de un marco teórico.

Para fundamentar el marco teórico en el que apoyamos este trabajo de análisis de textos y la evolución del modelo de partículas para explicar el comportamiento de la materia, presentamos en este capítulo lo que se entiende por conocimiento cotidiano, conocimiento escolar, y conocimiento científico, la interacción entre ambos y la importancia de la modelización en dicha interacción.

El querer distinguir entre conocimiento cotidiano, escolar y científico, es difícil porque el conocimiento del hombre como individuo es un todo que no está parcelado, y no si adquieren distintos conocimientos en cada contexto aislado.

### **Conocimiento cotidiano**

Nosotros entendemos por conocimiento cotidiano lo que el hombre aprende de forma espontánea sin la enseñanza institucional. También hay autores que lo llaman conocimiento natural.

Existe un acuerdo general de que el hombre desde que nace va adquiriendo conocimientos en contacto con su medio, va elaborando teorías y modelos explicativos de la realidad, que le permiten desenvolverse y relacionarse.

El hombre de la calle incluso el que nunca fue a la escuela siempre ha contado con teorías implícitas para explicarse el comportamiento de los hechos que ocurren a su alrededor, su toma de decisiones, y sus comportamientos. Podemos decir que son teorías porque no son ideas aisladas sino organizadas con una estructura para él lógica y sobre todo útil para explicar algún dominio de la realidad. Estas teorías implícitas no son hipótesis sino verdaderas creencias (Rodrigo, 1994)

Esas teorías implícitas le permiten interpretar los hechos naturales y las situaciones sociales, adquiriendo hábitos y comportamientos de similares significados para su cultura.

Las influencias culturales en el aprendizaje son muy importantes y condicionan el desarrollo cognitivo y afectivo del niño desde su infancia, desde influencias ligadas a roles propios del sexo, mujer u hombre en las distintas culturas, hasta características muy peculiares del entorno próximo. Llorens, (1989) define el concepto de microcultura como un conjunto de experiencias o prácticas cotidianas, ideas transmitidas por el ambiente

familiar, social o los medios de comunicación que interactúan con el aprendizaje escolar en la construcción de un núcleo específico de conceptos, en una situación espacio-temporal definida, planteado como una característica inherente a esta microcultura su variabilidad y dinamismo, lo que está de acuerdo con la concepción constructivista del aprendizaje, cuyo origen puede situarse en la Teoría de la Construcción Personal de Kelly (1959), quien concibe la conceptualización como un proceso activo; cualquier persona independientemente de su desarrollo y nivel intelectual está continuamente elaborando un modelo de la realidad que le permite interpretar y predecir situaciones específicas.

Cada persona puede interpretar su entorno de distinta manera dependiendo de su imaginación y experiencias.

Estas teorías o conjeturas se van modificando permanentemente en función de su utilidad para describir y predecir eventos. Kelly denomina ciclo creativo a la forma en la cual a menudo cambiamos nuestras construcciones.

Dicho ciclo constaría de tres fases:

a) **circunspección**, fase de rodeos en la cual tienen cabida las fantasías y los sin sentido.

b) **invención**, fase en la cual nos centramos en formular la pregunta clave para responder a lo que nos interesa;

c) **control**, fase en la cual damos a nuestra pregunta una respuesta operativa.

La posición epistemológica de Kelly mantiene que es excesivo reclamar que las construcciones de las personas sean coherentes con la realidad. Cada evento es susceptible de múltiples reconstrucciones. Cada persona elabora un modelo de la realidad que es individual y no compartido totalmente por ninguna persona, aunque después de las numerosas investigaciones realizadas sobre las concepciones de los alumnos sobre muy diversos temas, que han generado numerosa información empírica, esta individualidad del pensamiento espontáneo no es sostenible, ya que en todos los ámbitos en que han sido estudiadas se han determinado interpretaciones que son compartidas por casi todos los estudiantes, a pesar de no haber sido enseñadas.

El niño o el adulto no desarrollan estas explicaciones a través de actividades de aprendizaje planificadas, sino que, en interacción con su medio, construye activamente significados de los objetos, hechos y fenómenos que forman parte de la experiencia, de acuerdo con las características que definen su conocimiento cognitivo.

Estas representaciones no se construyen en un proceso individual, sino que tienen lugar en un medio social caracterizado por la interacción y el intercambio, y son imprescindibles para el individuo por su valor funcional, ya que hacen posible que se comprenda el contexto en el que se desenvuelve e incluso que prediga sucesos futuros.

Apoyando estas ideas podemos citar a Pozo (1996) para el que el conocimiento de las ciencias se adquiere por tres vías que están en continua interacción:

1. Origen sensorial. En el intento de dar significado a las actividades cotidianas, se elaboran reglas o teorías que nos permiten explicarnos el funcionamiento del mundo natural. Buena parte de la física y química intuitiva y de los conocimientos

sobre la salud y la enfermedad se apoyan en este tipo de reglas entre las que estarían :

a.- La semejanza entre causa y efecto entre la realidad que observamos y el modelo que la explicaría. Si hace calor nos quitamos ropa; la ropa da calor.

b.- La continuidad espacial o si es posible el contacto físico entre causa y efecto. La bombilla más próxima a la pila luce más.

c.- La continuidad temporal entre causa y efecto. Si me duele el estomago es porque lo que comí estaba mal.

d.- La covariación cualitativa y cuantitativa entre causa y efecto. Si se aumenta la causa debe aumentar proporcionalmente el efecto. A mayor intensidad del fuego la temperatura del agua que hierve debe ser mayor.

2. Origen cultural. En contacto con el entorno se adquieren creencias socialmente inducidas por numerosos hechos y fenómenos. En el momento actual estamos bombardeados de información por los medios audiovisuales que generan informaciones científicas de carácter divulgativo que a veces originan más confusión que conocimiento si no se sabe filtrar o reelaborar dicha información.

3. Origen escolar. No podemos olvidar que el niño desde pequeño asiste a la escuela recibiendo unas enseñanzas que interaccionan con las anteriores y van a influir en posteriores aprendizajes.

La presentación deformada o simplificada de ciertos conceptos conduce a una comprensión errónea. El alumno tiende a asimilar los conocimientos escolares de forma análoga a sus otras fuentes de conocimiento, sin entender que son complementarias pero diferentes. Los modelos científicos (usualmente referidos a estructuras no observables del macrocosmos y del microcosmos) no se entienden como tales, así a la estructura microscópica de la materia se la atribuyen propiedades macroscópicas y viceversa.

Los modelos utilizados por los estudiantes, o conocimiento natural, han sido muy estudiados en la década de los noventa utilizándose diferentes terminologías al referirse a ellos. Se han llegado a contabilizar hasta 21 denominaciones diferentes la mayoría de las cuales han sido recogidas por Jiménez, Solano y Marín (1994).

Se considera que la utilización de diferentes terminologías no es una cuestión de gusto personal, y que aunque las etiquetas elegidas puedan ser usadas sin que el investigador le asocie una serie de postulados teóricos subyacentes, dejan traslucir conceptualizaciones de fondo diferentes que implican determinados compromisos teóricos (Cubero 1994).

Distinguiéndose aquellas que lo consideran como un conocimiento inferior y lo denominan: concepciones erróneas (Helm 1980), errores conceptuales (Caramazza, McCloskey y Creen 1981), conceptos erróneos o ideas falsas (Meaut, Saltiel y Tiberghien, 1985) o con otras denominaciones menos peyorativas como, preconcepciones (Novak 1977), ciencia de los niños (Osborne 1980), marcos alternativos (Driver 1981), concepciones alternativas (Driver y Easley, 1978) razonamiento espontáneo (Viennot, 1979), Preconceptos (carrascosa y Gil 1985) ideas ingenuas, ideas preinstruccionales, y en general en toda la literatura francesa, esquemas conceptuales alternativos, pero en todo caso toda la experiencia del hombre de la calle como constructor de teorías cotidianas, quedo devaluada al perderse el sentido y la funcionalidad que tiene el conocimiento

cotidiano frente al conocimiento científico.

Dependiendo de la visión del investigador se han adoptado distintas posturas:

Cuando el acento se pone sobre la incorrección de las creencias, manifiesta una perspectiva que subvalora la actividad del niño, comparando las ideas de éste con el conocimiento científico y las valora como equivocadas, orientando todos sus esfuerzos en detectar esas falsas concepciones para eliminarlas o repararlas. Dentro de esta tendencia cabe considerar la perspectiva del cambio conceptual como revolución basándose en las revoluciones científicas de Kuhn (1975). Los investigadores con una visión "revolucionaria" tenderán a considerar las ideas previas de los estudiantes como un potencial obstáculo (barrera) para los nuevos aprendizajes.

Las cuestiones a investigar se centran en la identificación de ideas específicas y la determinación de su estabilidad. El propósito de la instrucción, según esta tendencia, es cambiar las ideas previas que puedan suponer una barrera para nuevos aprendizajes. Para Abimbola (1988), los investigadores que comparten esta perspectiva tenderán a considerar las ideas previas de los estudiantes, no consistentes con la ciencia aprendida a partir de la instrucción formal, de forma negativa y, por lo que respecta a este aspecto, los considera cercanos al empirismo. Ahora bien, las propuestas de enfoques de "conflicto y reformulación" (Erickson, 1980; Nussbaum y Novick, 1981) recomendadas para provocar un cambio conceptual en la estructura cognitiva de los alumnos sitúan a esta perspectiva dentro de la teoría del cambio conceptual.

Los investigadores con una perspectiva evolutiva basada en la visión de Toulmin (1967) consideran las ideas previas como un esquema alternativo sobre el cual anclar los nuevos aprendizajes, serán más tolerantes con las ideas previas que no coinciden con el conocimiento científico.

En el aprendizaje de las ciencias, sobre todo en los niveles elementales, es muy difícil la delimitación entre conceptos cotidianos y científicos, que coexisten en los alumnos con significados distintos en ambos contextos.

El desarrollo de un concepto científico se asemejaría más bien al abandono e incorporación de nuevos significados y a la evolución de las interconexiones entre ellos (Llorens, 1989).

Los profesores, en nuestro empeño en hacer comprender los conceptos científicos nos vemos continuamente obligados a utilizar un lenguaje cercano y fácil para el alumno con lo que gran parte de la terminología que utilizamos procede del lenguaje ordinario, al que nosotros damos un significado que no tiene porqué coincidir con el que le da el alumno. Puesto que en este capítulo analizamos la relación entre conocimiento cotidiano y conocimiento escolar no podemos olvidar la influencia del lenguaje en el aprendizaje, en cualquier disciplina pero quizás más en la nuestra, donde un mismo término lingüístico tiene diferentes significados dependiendo del contexto o de sus connotaciones; muchas de las palabras que utilizamos no tienen sentido para el alumno, aunque para nosotros sean normales.

La importancia del lenguaje en el aprendizaje ha sido puesta de relieve por diversos autores, no solo en el sentido antes aludido, sino también porque muchas de las dificultades de comunicación del profesor con sus alumnos, parten del lenguaje ya que suelen tener un vocabulario muy pobre, les falta habilidad para entender.

Por la misma razón los profesores utilizamos imágenes o analogías que intentan simplificar la tarea de comprender conceptos abstractos. Los estudiantes pueden fácilmente

malinterpretar o tomar demasiado ligeramente estos recursos o ayudas, con lo que estamos consiguiendo un efecto contrario al deseado creando errores conceptuales.

### **Conocimiento científico y conocimiento escolar.**

En el estudio de la naturaleza de la ciencia se distingue entre ciencia *privada* y ciencia *pública* (Holton 1973). La idea que subyace en estas nociones es la distinción entre la ciencia en desarrollo, es decir, el proceso de creación de las ideas científicas, y la ciencia hecha lista para ser transmitida a la comunidad científica. Los problemas que plantea una y otra faceta de la ciencia son diferentes.

El paso de una a otra clase de ciencia no está exento de problemas. Medawar (1963) advertía sobre los peligros del tránsito de la ciencia en desarrollo a la ciencia pública presentada por el artículo científico típico, que según su opinión da una imagen fraudulenta de la actividad de producción científica es decir de la ciencia privada.

Según Giere (1988) la ciencia es una actividad cognitiva a partir de la cual se generan teorías que son un tipo especial de representaciones del mundo. Cada teoría científica está relacionada con aquel, de una determinada manera y se corresponde con una forma distinta de mirarlo (Arca et al., 1993). Así, por ejemplo, al afrontar el estudio de una roca, un geólogo ve unos aspectos en función de su marco teórico, y un químico, un físico, un ecólogo, un arquitecto, etc. ven otros muy distintos, aunque a unos y otros les pueda ser útil reconocer las diversas formas de mirar, de teorizar (Sanmartí, 1987).

La ciencia pública, que se presenta a los estudiantes, al igual que la que se materializa en un artículo, resulta de una reformulación de la ciencia privada y por ello su estructura no es obvia ni inmutable (Otero, 1989).

La ciencia escolar utiliza modelos propios (Izquierdo et al., 1996), que son transposiciones didácticas de los modelos de las distintas teorías científicas disciplinares. En cómo se entiende esa transposición de la ciencia de los científicos a la ciencia escolar se plantean distintos debates:

Por un lado, la discusión se centra en la relación entre los factores racionales y sociales en el cambio o evolución de los modelos teóricos científicos. Las aproximaciones de Popper, Kuhn, Lakatos, Toulmin, Giere y muchos otros estarían en el centro de este debate.

Popper (1959) por ejemplo considera que la Psicología del conocimiento debe ocuparse de lo que plantea la ciencia en desarrollo mientras que la lógica del conocimiento científico se ocupa de la justificación de la validez de la ciencia tal como se presenta después del proceso de creación.

En relación con este debate se han desarrollado muchos de los modelos didácticos actuales de enseñanza científica. Implícita o explícitamente se pueden relacionar proyectos de enseñanza científica y distintos modelos epistemológicos, y se han estudiado posibles similitudes y diferencias entre la construcción del conocimiento científico a lo largo de la historia y la construcción por parte del alumnado, de tal manera que, actualmente, cuando se habla de constructivismo, cuesta diferenciar si se está hablando de un determinado modelo epistemológico, psicológico o didáctico.

Los argumentos basados en la historia de la ciencia, a pesar de su indudable peso, son discutibles. Esta necesidad de considerar el paralelismo entre la génesis del

conocimiento a lo largo de la historia y en el alumnado ha sido puesto en duda en relación con las posibles etapas del cambio conceptual (Saltiel y Viennot, 1985).

Por otro lado, un segundo debate surge en la investigación didáctica al plantearse la enseñanza de la educación ambiental a finales de la década de los noventa que se cuestiona si se puede hacer desde una ciencia mecanicista, iniciada en el siglo XVII y basada en el principio de la separación y reducción de variables en el estudio de los fenómenos, y que dio lugar a las diferentes disciplinas científicas, o una ciencia post-normal, moderna o de la complejidad que se plantea el análisis de los problemas desde su complejidad y surgida fundamentalmente de los planteamientos sistémico-ecológicos, pero también de la física de partículas, la termodinámica y otras ciencias.

Pero la diferenciación no se basa sólo en el posible carácter simplificador o complejo de la ciencia, sino también en algunos de los principales conceptos en los que se sustentan ambos enfoques. Así, por ejemplo, la ciencia antigua se asocia al determinismo, mientras que la ciencia del siglo XX se asocia a la incertidumbre.

En ese amplio debate hay quien como Gil (1993), defiende que la ciencia compleja sólo puede ser el resultado al que se llega después de aproximaciones inicialmente simplificadoras y disciplinares. Ello se justifica por la propia historia de la ciencia y por el hecho de que cada disciplina estudia niveles de organización de la materia distintos, que no se pueden mezclar sin caer en una visión empobrecida de la realidad.

Para otros como Sanmartí (1997) y otros, la ciencia escolar debe definir su propio campo experimental y teórico y se va a caracterizar no sólo por los conceptos objeto de estudio (conceptos estructurantes) sino también por el tipo de problemas planteados, por el lenguaje y, muy especialmente, por los valores asociados. Según ellos estos conceptos o ideas-fuerza no pueden ser referidos a la ciencia disciplinar, sino a la ciencia de la complejidad, o mejor aún, a la ciencia crítica y proponen un modelo crítico orientado a formar alumnos con conocimientos teórico prácticos que posibiliten su participación democrática en la gestión colectiva de los problemas del planeta.

Podemos afirmar que no existe un único modelo de ciencia escolar. Cada modelo contiene explícita o implícitamente una concepción de las finalidades de la enseñanza científica.

La ciencia escolar que se lleve a cabo dependerá de que respuesta demos a las preguntas ¿para qué enseñar ciencia? ¿Qué ciencia queremos transmitir?

La utilidad del conocimiento escolar debe buscarse fuera del propio centro educativo, sin embargo la mayoría de los contenidos que se estudian en él no se utilizan fuera. La verdadera dimensión educativa de los contenidos radica en su capacidad para convertirse en instrumentos de interpretación y de respuesta a los distintos momentos y situaciones fuera del centro.

La ciencia escolar debe preparar para la vida. ¿Cuáles son entonces las razones que guían esta transformación? Para la enseñanza parecería sensato que deberían primar las razones pedagógicas; la ciencia así reformulada debería ser más fácil de aprender.

Una gran parte de la ciencia escolar consiste en un conjunto de herramientas conceptuales que se proporcionan al alumno, aparentemente salidas de la nada y sin justificación al menos explícita.

Otero (1989) sostiene que, en particular, el contenido conceptual que se presenta al alumno no contiene problemas sino únicamente las soluciones, cuestionándose si puede haber alguna razón por la que se ha considerado adecuado aprender solamente los

resultados conceptuales de la ciencia y la forma en que se aplican, ignorando componentes de la ciencia en desarrollo, como los problemas que dieron lugar a las respuestas conceptuales que recogen los libros de texto.

Una de las dificultades para el aprendizaje significativo de las reformulaciones tradicionales del conocimiento científico se encuentra en la posibilidad de elaborar la nueva información. Al suprimir los problemas de las reformulaciones conceptuales de la ciencia realizadas con propósitos pedagógicos desaparece un componente que hacía menos arbitrario el contenido conceptual de la ciencia.

Los conceptos científicos “caen del cielo” como apuntaba Lakatos en su crítica al estilo deductivo de muchas presentaciones de las matemáticas. Partiendo de la teoría del aprendizaje de Ausubel (1978) el aprendizaje significativo tiene lugar cuando el que aprende conecta de manera no arbitraria la nueva información con las ideas que ya posee, cuando es capaz de establecer relaciones.

En algunas investigaciones llevadas a cabo por Otero y Brincones sobre conceptos termodinámicos concluyen que las conexiones que crean los estudiantes entre las proposiciones correctas y su estructura de conocimiento eran débiles, la elaboración era deficiente y lo achacan a la arbitrariedad inicial de la información científica que se le presenta al alumno. La eliminación de los problemas que permiten disminuir la arbitrariedad aparente que tienen para el principiante los conceptos y las proposiciones de la ciencia proponen utilizar la historia de la ciencia pero no como hasta ahora, no se trata de introducir la historia como ilustración del proceso de desarrollo de la ciencia de manera colateral a las formulaciones escolares establecidas en la ciencia pública, se trataría más bien de usar la ciencia privada como materia prima sobre la cual trabajar para conseguir estructuras conceptuales de la ciencia escolar con más significado.

La estructura de la ciencia escolar viene condicionada en primer lugar por los currículos oficiales, recogidos en los Reales Decretos de enseñanzas mínimas y las concreciones curriculares de las distintas autonomías, que a su vez se supone se apoyan en las investigaciones y que las editoriales se encargan de promover.

Una mayoría de los profesores aceptamos como buena estas estructuras conceptuales de la ciencia escolar sin plantearnos el porqué debe ser así y repetimos sin cuestionarnos la formulación de la ciencia que se le presenta al alumno, que parece inmutable y la única posible (Martín del Pozo, 1995).

## ↪ **UN EJEMPLO DEL DESARROLLO DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO: *La naturaleza corpuscular de la materia***

### ***1.- Génesis y desarrollo histórico de la Teoría Cinético Molecular.***

Los intentos de explicar el comportamiento de la materia han estado ligados a profundos cambios en nuestras ideas sobre la realidad física. Uno de estos intentos fue el que realizó la filosofía griega. Podemos diferenciar claramente tres visiones distintas de la explicación de la materia en el pensamiento griego de la antigüedad.

- a. La atomista o mecanicista de Leucipo y Demócrito.
- b. La visión cualitativa de Aristóteles.
- c. La teoría geométrica de Dalton.

Tradicionalmente se afirma que el fundador de la escuela atomista fue el filósofo Leucipo. Sabemos muy poco de su vida, tan poco que se ha llegado a afirmar que quizá nunca existió. Sea como fuere, quien verdaderamente dio cuerpo a la teoría atomista fue Demócrito, uno de sus alumnos, nacido en Abdera, alrededor del año 494 a. C.

En tiempos de Demócrito, allá por el siglo V a.C., las distintas escuelas filosóficas se encontraban divididas básicamente en dos: la que consideraba que todo está en permanente cambio y que, por tanto, nada permanece constante; y la que afirmaba que la realidad en su conjunto es estática y que, aunque pueda parecer lo contrario, en el fondo nada cambia nunca.

Leucipo y Demócrito defendieron la existencia de un número infinito de unidades indivisibles que llamaron "átomos". Según ellos, los átomos son tan pequeños que no los podemos percibir, pero tienen distintos tamaños y formas. Además, estas partículas están en continuo movimiento en el vacío, por lo que se producen choques entre ellos. De estas colisiones surgieron los cuatro elementos básicos –agua (Nestis), aire (Edoneo), tierra (Hera) y fuego (Zeus)- que, según los griegos, dan lugar a todo lo demás, gracias a la ayuda de dos fuerzas metafóricas, como primer motor, que se llamaron Amor y Discordia.

Con la teoría de los átomos, Leucipo y Demócrito podían explicar los continuos cambios que percibimos -los choques de los átomos producen estos cambios- aceptando a la vez la teoría de Parménides de que el ser de las cosas es siempre el mismo, ya que para ellos, la idea fundamental es que existe un número de unidades corpóreas, incompresibles, indivisibles y formadas por una sustancia inalterable a las que dan el nombre de átomos. Éstos se desplazan en el vacío infinito.

La solución de los atomistas fue ingeniosa, si bien no era del todo original, ya que Leucipo y Demócrito se basaron en las teorías de otros filósofos como Anaxágoras y Pitágoras. Quizás lo más importante de esta visión de la naturaleza es su visión puramente mecanicista de la realidad.

En la antigüedad tardía, la teoría atomista tuvo como representante más importante a Epicuro, que nació en Samos, isla del mar Egeo, en el año 341 a. de C.

Realizó estudios filosóficos con Nausífanos, en la isla de Teos, donde descubrió la doctrina de los átomos de Demócrito, que sería el fundamento de su filosofía. En la doctrina de Epicuro se observa el giro que la filosofía griega dio a partir de Sócrates. El objetivo de filosofar no es ya el conocimiento por sí mismo, sino la búsqueda de la felicidad del hombre. Para Epicuro esta felicidad se obtiene a través del placer, entendido éste como la ausencia de dolor y la liberación de los miedos que perturban al hombre. De esta forma, se explicaban todos los fenómenos por el movimiento mecánico de los átomos, haciendo superfluo cualquier recurso a la intervención de los dioses.

Demócrito había postulado la infinitud de formas atómicas y la presuposición básica del atomismo es que todos los cambios en la naturaleza son discontinuos. Esto le llevaba a deducir un número infinito de tamaños atómicos. Los habría de tal tamaño que podríamos verlos e incluso habría átomos de tamaño cósmico. Epicuro rechazó la idea de átomos "macroscópicos".

De todas formas, lo que más separa y diferencia las ideas atomistas de Demócrito y Epicuro es su noción de las trayectorias de los átomos. Epicuro supuso que se producía un movimiento espontáneo de los átomos en sentido oblicuo, es decir, una desviación repentina por la que se apartaban de su trayectoria rectilínea. Intentaba de esta manera justificar la libertad humana. Está fuera de duda que Epicuro fue el que desarrolló la teoría molecular griega, intentando precisar las propiedades físicas de las moléculas.

Pese a esto, debemos decir que fueron Leucipo y Demócrito los primeros en concebir la idea de molécula como asociación de átomos, ambos olvidaron las fuerzas continuas. Epicuro rechazó las fuerzas que permitían unir átomos, aunque fuese temporalmente. Aristóteles reconoció esta debilidad del atomismo y se preguntaba cómo diferenciarían los filósofos atomistas el agua del hielo.

### *Ideas cinéticas sobre el comportamiento de los gases*

Una nueva ciencia, la mecánica, es a partir del siglo XVII el nuevo punto de convergencia de numerosos personajes de ciencia. La historia de la mecánica comienza su andadura con Galileo y pasa por personajes del calado de Gassendi, Descartes, Pascal, Leibniz y Newton. A partir de aquí la labor sería precisar mejor sus leyes, aplicarlas a diferentes sistemas y obtener los frutos de tan elaborada teoría.

Seguiremos la división de las ciencias físicas del historiador y filósofo de la ciencia T. S. Kuhn. Hablaremos de ciencias baconianas (electricidad, magnetismo, calor, química y partes de la mecánica de fluidos), ciencias no dependientes de estructuras matemáticas, frente a las ciencias físicas clásicas como la mecánica y la astronomía, estrechamente unidas a las matemáticas.

#### **Las ciencias baconianas.**

A partir del siglo XVII son cada vez más frecuentes las observaciones, tanto preparadas como no preparadas, de fenómenos con fines científicos. Los experimentos se convierten en una forma de conocimiento y de comprobación de lo obtenido por la teoría.

Los científicos de corte baconiano logran con el tiempo llegar a un equilibrio entre experimentación y teoría, pero el método inductivo que elaboró Bacon pretendía proporcionar un instrumento para analizar la experiencia, a partir de la recopilación exhaustiva de casos particulares del fenómeno investigado y la posterior inducción, por analogía, de las características o propiedades comunes a todos ellos. Según Bacon, ese procedimiento había de conducir, gradualmente, desde las proposiciones más particulares a los enunciados más generales.

Aun cuando el método baconiano ejerció, nominalmente, una gran influencia en los medios científicos, lo cierto es que el filósofo desarrolló su pensamiento al margen de las corrientes que dieron lugar al surgimiento de la Ciencia moderna, caracterizada por la formulación matemática de sus resultados, a la que él mismo no concedió la importancia debida. Bacon concibió la Ciencia como una actividad social ligada a la Técnica, elaborando una utopía, “Nueva Atlántida” (The New Atlantis, publicada póstumamente en 1627), basada en la organización científica de la sociedad.

Así fueron ganando terreno para esa nueva forma de hacer Ciencia, avalados por logros tan destacados como la determinación de pesos específicos o la Ley de los Gases, que relaciona volúmenes y presiones, trabajos ambos del baconiano más prestigioso, Robert Boyle, cuya actitud científica está un tanto alejada ya de los planteamientos de Bacon.

La adopción del corpusculismo por los baconianos favoreció que las actividades experimentales fueran cada vez más científicas y menos mágicas. En Italia, se llamó “experimento filosófico” al proceso de determinación de la presión atmosférica por Torricelli. Incluso a los aparatos nuevos que se fueron introduciendo se les llamó “instrumentos filosóficos.”

Boyle, este magnífico baconiano convencido, que, según él mismo dijo,

fundamentó su tendencia experimentalista en la Teoría corpuscular, a la que denominó “Filosofía Mecánica”. Construyó una balanza hidrostática, junto con Robert Hooke (1635-1730): con ella pudo zanjar el problema de la determinación de los pesos específicos que venía preocupando especialmente a quienes manejaban sustancias para la preparación de medicamentos.

También construyeron una máquina neumática, a raíz de la fabricada en Alemania por Otto von Guericke, para realizar experimentos en vacío o en condiciones de presión variable. Las cuestiones relativas al peso del aire y a la existencia o no del vacío, (todavía subsistía la teoría del “horror vacui”, horror al vacío de la Naturaleza), ocupó a la mayoría de los filósofos, experimentales o teóricos, del siglo XVII. Por fin se quedó fuera de toda duda que el aire pesaba, siendo Boyle quien determinó con mayor aproximación su peso específico respecto al agua. Su célebre “Hypothesis”, Ley de las presiones y volúmenes, no la publicó hasta 1662.

### **Las ciencias físicas clásicas.**

Un aspecto sobresaliente de la Revolución Científica del Barroco es la búsqueda de una metodología adecuada. En el continente hay que destacar a Descartes, que se diferenció de Bacon por su énfasis en las Matemáticas, considerada la reina de las Ciencias, por la insistencia en el razonamiento deductivo. Descartes, que latinizó su nombre como Renatus Cartesius, de donde procede la denominación de sistema y coordenadas cartesianas de la Geometría Analítica que él ideó.

Estuvo acertado al afirmar que los movimientos naturales se producen con velocidad uniforme y en línea recta, no en círculo como había propuesto Galileo, de manera que fue Descartes y no el pisanó quien formuló el Principio de la Inercia. En síntesis, sus “Principia Philosophiae” (1644) conciben un Universo lleno de materia y divisible hasta el infinito (niega, por tanto, la atomicidad y el vacío), alrededor de cuyas partículas se generan torbellinos, de tal forma que una no puede moverse sin provocar movimiento en las contiguas. Así, los planetas, embarcados en esos torbellinos, pueden describir sus respectivas órbitas: no tenían cabida en este concepto las indiscutibles leyes de Kepler (1571-1630).

Sin embargo, sin duda la figura de Newton es la más sobresaliente de las ciencias físicas clásicas. Newton adquiere su formación general y científica cuando en Inglaterra estaba en pleno apogeo el baconianismo, aunque la instrucción recibida en el Trinity College de la Universidad de Cambridge estaba centrada, como era propio de la enseñanza universitaria en cualquier país, en las Ciencias Físicas clásicas en contra del escolasticismo. De manera que participó simultáneamente de ambas tradiciones puestas de manifiesto en los “Principia”, la clásica, y en la “Optica”, la experimentalista, no estrictamente baconiana, porque para Newton la experimentación tenía una relación inmediata con la fundamentación teórica.

Sus Principios Matemáticos de la Filosofía Natural constituyen la primera gran síntesis del conocimiento científico, que echó por tierra los sistemas peripatético y atomista del Universo. La importancia de la obra no sólo se refiere a la dinámica de los cuerpos rígidos, sino también a los fluidos, lo cual no es tan conocido.

Durante el siglo XVII, la Mecánica adquiere un papel preferente en la Filosofía de la Naturaleza, que cada vez está más cerca de convertirse en una Física Matemática. Galileo defiende que las Matemáticas son ajustables a los objetos físicos, de manera que puede ser una herramienta útil para interpretar la Naturaleza si se tiene habilidad para

elegir los experimentos. En este sentido encuentra simulaciones (modelos), para obviar felizmente las dificultades: el plano inclinado le sirvió para extender sus conclusiones a la caída de los graves, demasiado rápida, y por tanto, incontrolable con los medios de entonces. Es mérito suyo desprenderse del verbalismo anterior para intentar explicar los fenómenos recurriendo a la Geometría como medio sistematizador y deductivo.

El problema estaba en que las explicaciones se enredaban como una cadena sin llegar a lo que Galileo consideraba el fin último de sus investigaciones: la esencia de las cosas.

Y es en este punto donde Newton revoluciona el “modus” científico, produciendo un sistema matemático y unos principios matemáticos que se podrían luego aplicar a la Filosofía Natural, esto es, al sistema del mundo y sus reglas y datos, tal y como se determinan por la experiencia. Este estilo le permitía a Newton tratar problemas de las Ciencias Exactas como si fueran ejercicios de Matemática pura, ligando los experimentos y las observaciones a las Matemáticas de un modo notablemente fructífero.

El estilo newtoniano también permitía dejar de lado, para un tratamiento independiente, el problema de la causa de la gravitación universal y el modo de su acción y transmisión.

Sus Principios de la Dinámica y la Ley de la Gravitación Universal, todo ello enmarcado en la opción de las acciones instantáneas a distancia, supuso la primera gran síntesis de la Física, que en lo sucesivo será tomada como referencia no sólo para los hechos mecánicos propiamente dichos; también se beneficiarán de esta síntesis las Ciencias baconianas en su transición hacia su catalogación como Ciencias clásicas.

Hay que destacar también la figura de Newton en el establecimiento de la Óptica Física, que a diferencia de la Óptica geométrica u Óptica de rayos, se interesa por la naturaleza de la luz y su comportamiento. Frente a la postura de Descartes, que mantiene la antigua idea de que la luz era una emanación de los ojos, coexisten las Teorías corpuscular de Newton, en consonancia con la corriente corpusculista de la época, y la ondulatoria del holandés Christian Huygens (1629-1695).

Daniel Bernoulli propuso lo que generalmente se considera la primera versión cuantitativa de la moderna teoría cinética. Desarrolla ecuaciones fundamentales para el estudio de los líquidos y los gases, y establece las bases de la teoría cinética de los gases, desarrollada en el siglo XIX.

A finales del siglo XVIII la Teoría Cinética fue más popular para explicar la gravedad que para explicar la presión de un gas. La popularidad que adquirió como explicación de la gravedad, aunque no llegase a resultado cuantitativo ninguno, nos indica el interés que siempre han tenido los físicos por comprender la acción a distancia.

### **Evolución del concepto de calor.**

A lo largo de la historia, el concepto de calor se ha explicado desde dos modelos: i) el sustancialista, que le asigna entidades similares a las de un fluido, y ii) el dinámico, que lo relaciona con el movimiento, siendo este último modelo la base fundamental de la concepción actual de calor.

Las concepciones de calor que se explican desde el modelo sustancialista –los cuatro elementos, alcahesto, flogisto y calórico– se caracterizan por considerar que existe una sustancia dentro del mismo cuerpo a la que se le atribuye que éste esté o más caliente o más frío.

La concepción que se explica desde el modelo dinámico —energía— se caracteriza por postular que el calor es: i) el intercambio de energía del sistema con el medio o sus

alrededores, y/o ii) las fuerzas o el movimiento de las partículas, involucrando la velocidad de reacción.

Mientras se desarrollaron discusiones en el siglo XVII y los primeros años del XVIII sobre la estructura de la materia, un acontecimiento importante, la teoría del flogisto, introdujo en la doctrina química la tan anhelada unidad. Al momento de una combustión el flogisto se desprende de los cuerpos, y esa pérdida de flogisto es la que explica el cambio de los cuerpos quemados. Por ejemplo, los aceites al ser quemados dan como resultado agua y aceites privados de flogisto. La idea de que el agente universal no podía ser sino el principio del fuego fue enunciada por Joachim Becher (1635-1682).

Esta teoría tuvo inconvenientes, ya que no daba cuenta del porqué al transformarse el metal en cal se producía un aumento de peso en la sustancia, mientras que al transformarse la cal en metal se observaba una disminución de peso. Era toda una contradicción, puesto que el metal estaba compuesto de cal y flogisto. Stahl, al tratar de explicar este fenómeno concluyó, inicialmente, que la diferencia de peso se debía a que el metal al perder flogisto durante la calcinación quedaba finalmente con la parte más pesada de la sustancia que lo componía.

Más tarde atribuyó dicho hecho a que al liberarse la parte inflamable –flogisto–, este dejaba vacíos en la materia, los cuales iban a ser comprimidos por el aire, lo que generaba, a su vez, que la sustancia aumentara su peso.

Es necesario resaltar aquí, que en el transcurso del siglo XVII se oponían dos teorías sobre el calor, la del flogisto, y la que razonaban los seguidores de los atomistas griegos, quienes admitían la corporeidad del fuego, considerando que este se constituía por partículas pequeñas, ligeras y sutiles, que tenían a su vez una enorme movilidad para penetrar en la materia en sus diferentes estados, capaces de operar simplemente con su presencia.

Las propiedades atribuidas a esta materia del fuego eran, en primer lugar, que se encontraba formada por átomos sutiles que tienen peso y, en segundo lugar, materia que se convertía en un fluido indestructible e inmaterial, el calórico.

Lavoisier y sus discípulos fueron los defensores de la teoría del calórico. Propusieron que no había necesidad de un agente hipotético para explicar las reacciones químicas, así el flogisto que había sido el principio del fuego, la luz, y del negro del humo, se transformó en hidrógeno mismo; por tanto, para explicar el fenómeno del aumento del peso de la sustancia cuando se calcinaba, comenzó a elaborar y a defender la idea de que ese aumento se debía a la fijación de una porción del aire atmosférico por parte del metal, de modo que se liberaba la materia del fuego o calórico y se formaba la cal correspondiente.

Entre 1775 y 1777 Lavoisier elaboró una teoría de los gases, en la que introducía el principio del calórico. En este periodo surgía el concepto de temperatura y empezaron a construirse termómetros, para medir la frialdad de las cosas. Joseph Black (1728-1799) utilizó estos termómetros para estudiar el calor, observando cómo las diferentes sustancias que se encontraban a desiguales temperaturas tendían a llegar a un equilibrio cuando se les ponía en contacto.

La teoría del calórico se basaba en dos premisas fundamentales: i) El fluido no se crea ni se destruye, ii) La cantidad de calórico transportado hacia o desde el objeto es directamente proporcional a la masa y a la temperatura del objeto.

Poco después se observó que las superficies expuestas a rozamientos se calentaban si no estaban suficientemente lubricadas. Los seguidores de la teoría de calórico argumentaron que el calor por fricción podía explicarse como una pérdida del fluido

calórico, es decir, el rozamiento obligaba al calórico a salir del material. En 1798 se demostró que ésta explicación no era correcta, mediante la famosa experiencia realizada durante la fabricación de un arsenal de cañones en Baviera.

Rumford se convenció de que el calor no era un fluido, sino una forma de movimiento. A medida que el taladro rozaba contra el metal, su movimiento se convertía en rápidos y pequeñísimos movimientos de las partículas que constituían el bronce. Igual daba que el taladro cortara o no el metal; el calor provenía de esos pequeñísimos y rápidos movimientos de las partículas, y, como es natural, seguía produciéndose mientras girara el taladro. La producción de calor no tenía nada que ver con ningún calórico que pudiera haber o dejar de haber en el metal.

Sin embargo, la teoría del calórico no fue abandonada hasta bien entrado el siglo XIX. Además de su sencillez, tenía la ventaja de que se habían llegado a conclusiones muy importantes tomándola como base. Carnot se sirvió de ella para poner las bases de la Termodinámica y, por poner otro ejemplo, Laplace dedujo la velocidad adiabática del sonido. Pese a este apoyo general a la teoría, los mecanicistas, como Rumford, opusieron alguna resistencia en los últimos años del siglo XVIII.

### **La teoría cinética de los gases y el siglo XIX.**

En el siglo XIX, las sociedades científicas se encuentran ya firmemente establecidas como guardianas de la ciencia ortodoxa, existe la profesión de físico y los resultados de la investigación ya no se publican mediante largos tratados, sino a través de artículos en revistas que, en cierto modo, se juegan el prestigio al publicarlos. La actividad científica ha cambiado su *status* en la sociedad; ya no corresponde a una extensión de la actividad filosófica tradicional, e incluso el nombre de Filosofía Natural ha dejado de estar asociado con la física, como ocurría en tiempos de Newton.

En 1816, un oscuro maestro inglés llamado John Herapath (1790-1869) publicó en los *Annals of Philosophy*, una pequeña revista privada, un trabajo titulado *Acerca de las propiedades físicas de los gases*, en el que obtenía las leyes de los gases ideales mediante un modelo esencialmente igual al de Bernouilli. Herapath identificaba el calor con el movimiento interno pero cometió el error de definir la temperatura como proporcional a la velocidad de las partículas en vez de a su energía cinética. A pesar de ello, puede decirse que fue el primero en demostrar que una teoría cinética es capaz de proporcionar explicaciones sencillas a fenómenos tales como los cambios de estado, la difusión o la propagación del sonido en el aire.

En 1820, Herapath presentó a la Royal Society su trabajo Una investigación matemática sobre las causas, leyes, y principales fenómenos del calor, gases, gravitación, etc., con la intención de que se publicase en las *Philosophical Transactions*. Aunque el trabajo fue presentado ante la Sociedad por Davies Gilbert, uno de sus miembros, se lo juzgó impropio de ser publicado en las *Transactions* por su carácter excesivamente teórico, o como dijo el propio Gilbert en su carta de contestación a Herapath, por ser algo tan abstruso y metafísico.

Condenado al ostracismo por la opinión oficial y habiéndosele cerrado incluso las puertas de las pequeñas revistas no oficiales, Herapath no alcanzó a ejercer influencia entre sus contemporáneos si exceptuamos a Joule, quién habiendo comenzado en 1848 a publicar trabajos sobre el tema, confesaba haber sido influido por las ideas contenidas en el libro *Mathematical Physics*, publicado por Herapath en 1847.

El drama de Herapath consiste en haber redescubierto esas ideas un demasiado pronto; cuando estaba llegando su tiempo pero todavía no había llegado. Era virtualmente

imposible que los hombres de ciencia adoptaran las ideas de Herapath sobre la constitución molecular mientras la teoría del calórico estuviese vigente. Sin embargo, a principios del siglo XIX el panorama había cambiado respecto a la época de Bernouilli y la hipótesis de que el calor no es otra cosa que movimiento *microscópico* ya no era una especulación más o menos imaginativa; ahora se trataba de la teoría alternativa que luchaba por imponerse y desbancar a las ideas establecidas y como tal fue tratada, analizada y sometida a escrutinio, incluso por aquellos que, desde otras posiciones o disciplinas, estaban contribuyendo a derribar el antiguo paradigma.

Ese momento es crucial para una nueva teoría y en él juegan usualmente un papel más relevante aquellos que consiguen imponer las nuevas ideas que quienes las habían formulado originalmente. En este caso, como en tantos otros, el abandono de las viejas ideas y el triunfo de las nuevas fue casi repentino, una vez que se consiguió vencer la inercia que tienen las ideas antiguas; incluso antes de la muerte de Herapath en 1869, la nueva teoría cinético-molecular por la que éste tanto había luchado estaba relativamente asentada y era respetada en el seno de la comunidad científica de la época.

Por ejemplo, el caso del escocés James Prescott Joule podía haber sido similar al de su contemporáneo Herapath. Joule era como éste un completo científico *alternativo* de su época pero encontró un valedor enérgico y constante en William Thompson (Lord Kelvin) y las cosas le fueron mucho mejor. Había publicado trabajos sobre la naturaleza del calor desde 1844, empleando un modelo microscópico que recordaba al de Euler. Sin embargo, la lectura de un libro de Herapath le indujo a adoptar la hipótesis de que es el movimiento de translación y no el de rotación el responsable de las propiedades de los gases. Concluyó que la temperatura del gas es proporcional al cuadrado de la velocidad y por tanto a la *vis viva* de las partículas, esto es a su energía cinética. Como era de esperar, los trabajos de Joule sobre teoría cinética tampoco ejercieron influencia en los círculos científicos de su época.

Si el caso de Herapath es dramático, cabría calificar de trágico el destino de John James Waterston (1811-1883), porque, él sí que se quedó literalmente en el umbral de la nueva época. Ya en 1843, Waterston había publicado en Edimburgo, de forma privada, un pequeño libro titulado *Pensamientos sobre las funciones mentales*, en el cual, sorprendentemente en un libro con ese título, incluía una breves notas resumiendo su teoría sobre la constitución física de los sistemas gaseosos. En una de ellas se introducía por primera vez el *camino libre medio*, una de los conceptos capitales de la teoría cinética y una idea que aun se sigue asociando con el nombre de Clausius. Como era previsible, dada la forma en que habían visto la luz, las ideas de Waterston no tuvieron ninguna repercusión entre las personas que se ocupaban de estos temas.

En un resumen publicado por 1851 con ocasión de una reunión de la *British Association for the Advancement of Science*, bajo el título *Acerca de una teoría general de los gases*, se afirma que el autor muestra que el resultado de este estado de movimiento debe proporcionar al gas una elasticidad proporcional a la media del cuadrado de la velocidad de los movimientos moleculares, y a la masa total contenida en la unidad de volumen; es decir, a la densidad del medio. Esta elasticidad, en un gas dado, es la medida de la temperatura. El equilibrio de presión y de calor entre dos gases tiene lugar cuando el número de átomos en la unidad de volumen es igual, y la *vis viva* de cada átomo es igual.

La temperatura, por lo tanto, en todos los gases, es proporcional a la masa de un átomo multiplicada por la media del cuadrado de la velocidad de los movimientos moleculares, siendo medida a partir de un *cero absoluto* situado 491° por debajo del cero de la escala Fahrenheit. Si se comprime un gas, la potencia mecánica gastada en esta

compresión es transferida a las moléculas del gas aumentando su *vis viva*; y correspondientemente, cuando el gas se expande, la potencia mecánica suministrada durante la expansión se obtiene a expensas de la *vis viva* de los átomos.

Este principio explica las variaciones de temperatura producidas por la expansión y condensación de los gases, las leyes de su calor específico bajo diferentes circunstancias, y la velocidad del sonido en ellos. El descenso de temperatura encontrado al ascender en la atmósfera, en ausencia de perturbaciones debidas a radiación o a otras causas, debiera coincidir con la *vis viva* necesaria para elevar a los átomos a través de una altura dada.

En 1856, Karl Krönig publicó un pequeño trabajo en los *Annalen der Physik* en el que elaboraba una teoría cinética reintroduciendo, aparentemente de manera independiente, las ideas de Bernouilli y Herapath pero sin ir realmente más lejos que ellos, salvo en lo que se refiere al carácter estadístico de la descripción.

Su estrategia para obtener expresiones de las magnitudes macroscópicas del gas mediante un modelo microscópico consistía en reemplazar el desconocido movimiento real de las moléculas por un modelo que permitiera el cálculo cuantitativo, ya que, aunque el camino de cada molécula debía ser tan irregular como para desafiar todo cálculo, siguiendo las leyes de la teoría de la probabilidad, se podía sustituir dicho movimiento irregular por uno dotado de una regularidad completa.

Por lo demás, el modelo mecánico de gas empleado por Krönig se basaba en admitir que un gas químicamente homogéneo puede describirse como un conjunto de esferas perfectamente elásticas que se mueven aleatoriamente, de modo que en cada instante de tiempo, el número de las que se mueven en la dirección de un eje coordenado es, por término medio, igual al de las que se mueven según cualquiera de los otros ejes.

Dado que el volumen ocupado por las moléculas es despreciable con respecto al volumen del recipiente, aquellas se pueden considerar como masas puntuales que se comportan en los choques como esferas duras, de manera que las fuerzas intermoleculares entre ellas sólo se ponen de manifiesto en el instante en que entran en contacto. Tras cada colisión, la molécula se moverá con velocidad uniforme hasta que vuelva a chocar o golpee la pared del recipiente. Por otra parte, dado que un gas aislado en un recipiente no muestra ninguna tendencia a perder su presión, Krönig razonaba que los choques entre las moléculas y los de éstas con las paredes debían ser perfectamente elásticos.

Empleando su modelo, Krönig calculó la cantidad de movimiento media transferida por las moléculas a la pared y eso le permitió obtener la presión que ejerce el gas. Sin embargo, su resultado resultó equivocado, entre otras cosas porque calculó mal la transferencia elemental de cantidad de movimiento que se produce cuando una molécula rebota contra la pared. A pesar de éste y otros errores y de que ninguna de sus ideas era realmente nueva, Krönig triunfó allí donde Herapath, Joule y Waterston habían fracasado sólo unos años antes: su trabajo rompería por fin la barrera de la indiferencia y de los prejuicios y sería leído y respetado, siendo considerado durante mucho tiempo como el punto de partida de la teoría cinética moderna.

La publicación del trabajo de Krönig tuvo la consecuencia adicional de proporcionar el estímulo para que el profesor Rudolf Clausius, ya por entonces un científico muy respetado por sus contribuciones a la Termodinámica, se decidiese a dar a la imprenta sus propias investigaciones sobre el tema. En el artículo del profesor berlinés, Clausius encontró algunas de las ideas que él mismo había estado madurando pero que no había publicado, probablemente, porque le parecían demasiado especulativas. En 1857, se decidió a elaborarlas y publicó un trabajo cuyo mero título: *Sobre la naturaleza del movimiento al que llamamos calor*, explicitaba de forma condensada el nuevo paradigma

cinético-molecular.

En dicho trabajo, Clausius generalizaba los modelos anteriores estableciendo que las partículas del gas podían tener sus velocidades dirigidas según direcciones arbitrarias en vez de moverse sólo según los ejes coordenados. Clausius supuso también de forma explícita que (para un gas en equilibrio térmico) la distribución espacial de las moléculas es homogénea y por lo tanto su densidad es la misma en todo el recipiente. También admitió que la distribución de velocidades de las partículas del gas es homogénea e isotrópica, de modo que si en cualquier lugar del recipiente tomásemos un elemento de volumen que contuviese un número suficiente de moléculas, encontraríamos que todas las direcciones de la velocidad estarían representadas con igual frecuencia.

Clausius nunca empleará un razonamiento de tipo probabilístico, razonando que a efectos del cálculo, puede sustituirse la desconocida distribución de velocidades por una velocidad promedio que se asigna a todas las moléculas por igual, y que debe ser escogida de tal forma que la energía cinética total del sistema sea igual a la que correspondería a la verdadera distribución de velocidades. Otro gran avance respecto a sus predecesores consistió en suponer que las partículas del gas podían tener energía asociada a la rotación y vibración además de la asociada al movimiento de traslación. Clausius fue, por lo tanto, el primero en enunciar una teoría cinética de los gases ideales poliatómicos.

Las contribuciones de Clausius a la teoría cinética son relevantes aunque se quedase casi siempre en un nivel semi-cuantitativo. Sus hipótesis le permitieron re-derivar la ecuación de estado de los gases ideales y obtener la primera evaluación cuantitativa de la velocidad de difusión.

Los trabajos de Clausius añadieron un prestigio considerable a las ideas cinético-moleculares y prepararon el camino para que James Clerk Maxwell (1831-1879) utilizara su formidable capacidad para el tratamiento matemático y, tras citar a Bernouilli como el antecedente más antiguo de sus ideas, calculase explícitamente la forma funcional que tiene la distribución de velocidades de un gas monoatómico en equilibrio.

Los primeros trabajos de Maxwell sobre teoría cinética, se publicaron en 1860 en el *Philosophical Magazine*. Paradójicamente, con ellos se cerró definitivamente la etapa de especulación más o menos semi-cuantitativa sobre la constitución molecular de los gases porque, lo que para Maxwell era un mero ejercicio de mecánica, cuya probable consecuencia sería la refutación de las ideas y especulaciones de la teoría cinética, no sólo fundamentó dichas ideas sobre una base más firme, sino que estableció los fundamentos de la mecánica estadística actual.

Uno de los resultados de la teoría indicaba que la viscosidad y la densidad de un gas deben ser independientes y ello le sugirió a Maxwell un experimento crucial, porque la teoría alternativa afirmaba que la viscosidad debía de crecer cuando lo hiciera la densidad. El experimento en el que el propio Maxwell probó la constancia de la viscosidad de un gas cuando, manteniéndolo a temperatura constante, se varía la presión a la que está sometido, fue decisivo en la conversión de los científicos de la época a las ideas cinético-moleculares.

A pesar de este resultado positivo, el propio Maxwell creyó haber encontrado argumentos cuantitativos que probaban que la teoría cinética no era correcta, por ejemplo, para explicar los calores específicos de los gases. No fue hasta 1875 que las medidas experimentales de Kundt y Warburg probaron la completa validez de las expresiones teóricas dadas por Clausius y Maxwell.

Uno de los resultados de la teoría indicaba que la viscosidad y la densidad de un gas deben ser independientes y ello le sugirió a Maxwell un experimento crucial, porque la teoría alternativa afirmaba que la viscosidad debía de crecer cuando lo hiciera la densidad.

El experimento en el que el propio Maxwell probó la constancia de la viscosidad de un gas cuando, manteniéndolo a temperatura constante, se varía la presión a la que está sometido, fue decisivo en la conversión de los científicos de la época a las ideas cinético-moleculares.

A pesar de este resultado positivo, el propio Maxwell creyó haber encontrado argumentos cuantitativos que probaban que la teoría cinética no era correcta, por ejemplo, para explicar los calores específicos de los gases. No fue hasta 1875 que las medidas experimentales de Kundt y Warburg probaron la completa validez de las expresiones teóricas dadas por Clausius y Maxwell.

### **Van der Waals y su tesis doctoral.**

Las bases del trabajo de Van der Waals fueron los artículos de Clausius sobre teoría cinética y la teoría de Laplace de la capilaridad. Lo que no sabemos es que conociese los trabajos, entonces recientes, de Hirn y Dupré.

La tesis comienza con una firme declaración sobre su convencimiento de la existencia de moléculas y sobre su confianza en la teoría cinética de los gases, sin la cual la teoría mecánica del calor tendría poco sentido.

Da cuenta en el epígrafe tercero de la tesis que la demostración de Joule y Thomson del enfriamiento de gases en expansión no es compatible con las fuerzas de repulsión originantes de la presión. Van der Waals no distingue aquí entre la expansión libre de Joule, y la expansión continua de Joule y Thomson, y muestra que no comprende la distinción. El experimento de Joule y Thomson, le da una evidencia directa de la existencia de una fuerza atractiva entre las moléculas, pero el epígrafe cuarto se abre con una afirmación sobre las fuerzas repulsivas que parece extraña para el lector moderno:

*“Si, no obstante, no existen fuerzas repulsivas entre las partículas del gas, no necesitamos asumir la existencia de una fuerza para explicar las propiedades de la materia en su condición sólida o líquida.”*

Nosotros consideramos ahora necesaria la fuerza repulsiva entre moléculas, pero para Van der Waals sólo habría que tener en cuenta la extensión de las partículas. Las moléculas para él tienen tamaño. Esta distinción aparece más tarde en su uso del teorema del virial, al tratar de fuerzas atractivas, pero no da efectos de tamaño.

El capítulo segundo es esencialmente una derivación del teorema del virial que finaliza con el cálculo cualitativo del tamaño relativo de algunos términos de su ecuación en gases y líquidos. Su lenguaje recuerda al de Laplace.

En su cuarto capítulo comienza con otra afirmación típica de una aproximación de campo medio y un cálculo de la energía configuracional de un líquido. Todavía retiene, en una forma más moderna, la vieja noción de Laplace, que el calor es un agente de repulsión entre moléculas. Van der Waals escribe que el volumen es determinado por el movimiento molecular, que tiene un valor dado para una temperatura dada. Él no apreció, con fuerzas aditivas a pares, una fuerza repulsiva o tamaño molecular, que es también necesario si la energía potencial permanece finita.

La corrección de volumen del gas por la sustracción del covolumen es el objeto del sexto capítulo. Él obtuvo el resultado correcto cuando estamos en el límite de densidad del gas cero, es decir, que el covolumen es cuatro veces la suma de los volúmenes de las moléculas. Su razonamiento es muy simple y correcto en el resultado. Está basado en una estimación del recorrido libre medio. Curiosamente Maxwell y Clausius se equivocaron en

este punto. Van der Waals no usó la distribución de velocidades de Maxwell porque había aprendido la teoría cinética de Clausius.

Los resultados cualitativos que obtuvo Van der Waals con su ecuación cúbica en el volumen, fueron lo más impresionante de su tesis. Por encima de la temperatura crítica, había sólo una raíz real para cada presión, y por debajo había tres. Su ecuación explicaba la condensación de los vapores a líquidos y justificaba la conjetura de James Thomson en el encuentro de la *British Association* en 1871.

Las características de esta ecuación supusieron un gran avance para el desarrollo de una teoría de conjunto de los estados fluidos. El principio de los estados correspondientes llegó más tarde, pero sabía demostrar que la razón por la que no pueden ser licuados a temperatura ambiente los llamados gases permanentes, era la debilidad de las fuerzas atractivas y, por tanto, del coeficiente  $a$ . Su estimación de la temperatura crítica del aire,  $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es una razonable aproximación del valor actual,  $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Principalmente, hubo tres críticas para las tesis. La primera es que Van der Waals no trata las fuerzas atractivas y repulsivas de la misma manera, pues usa el teorema del virial sólo para las primeras. Maxwell afirmaba, y Lorentz lo demostró explícitamente más tarde, que ambas pueden manejarse con este teorema.

Sus otras dos críticas fueron más serias. La segunda es la ecuación de la energía cinética media de las moléculas, que nosotros ahora escribimos  $(3/2) RT$ . Maxwell cree erróneamente que esto es sólo correcto para un gas. El mismo Maxwell había recientemente especulado que las moléculas en un líquido se movían más lentamente que si estuvieran en un gas.

La tercera crítica de los resultados concierne al covolumen,  $b$ , que Maxwell recalculó por el teorema del virial, despreciando la fuerza atractiva. En este cálculo, los resultados no coincidían con los de Van der Waals, aunque si lo hubiese calculado con lo que ahora conocemos como segundo coeficiente del virial, los resultados hubiesen coincidido. Sin embargo nunca lo hizo y no se retractó de su crítica.

### **La teoría cinética y la estadística.**

Los trabajos de Clausius estaban basados en una distribución de velocidades uniforme para las moléculas del gas. Maxwell, que por simple curiosidad había sido un lector regular de Clausius, y al que se refiere como el fundador de la teoría cinética de los gases, se propone como un mero ejercicio examinar el mismo problema substituyendo dicha hipótesis por una distribución probabilística de velocidades. En un trabajo intitulado "Ilustraciones de la teoría dinámica de los gases" publicado en 1867 deduce su bien conocida distribución  $f(v)dv$ , donde  $\alpha$  es una constante independiente de  $v$ . Con este resultado Maxwell logró explicar algunas discrepancias que había entre los valores teóricos para  $\gamma = C_p/C_v$  y los resultados experimentales.

Es pertinente señalar que en la deducción de la distribución  $f(v)dv$  aparece por vez primera una hipótesis de naturaleza ajena a la dinámica molecular, a saber, la isotropía del espacio de velocidades. Inspirado por este primer éxito, Maxwell examina posteriormente los cálculos de Clausius para los coeficientes de transporte y utiliza por vez primera el concepto de una función de distribución dependiente del tiempo para elaborar una teoría matemática formal para los fenómenos de transporte.

La ecuación de transporte de Maxwell nunca pudo ser resuelta por él. Sin embargo encontró que las integrales asociadas a los coeficientes de transporte podían calcularse sin conocer explícitamente la función de distribución para el caso muy particular en que el potencial intermolecular dependiera del inverso de la quinta potencia de la distancia entre

las moléculas. Este modelo, ahora conocido como el "gas de Maxwell", no tiene ningún carácter real excepto el haber permitido el cálculo de propiedades de transporte a partir de la ecuación de transporte.

Para esa época la termodinámica clásica estaba madura y tenía una fuerte aceptación entre los físicos y químicos de entonces. Clausius había introducido el concepto de entropía en 1859 y el cálculo de funciones termodinámicas a partir del experimento era ya casi un ejercicio de rutina. Por otra parte, la teoría cinética de la materia podía interpretar algunas propiedades mecánicas y térmicas de gases en base a modelos moleculares burdos. Es en este estado de eventos cuando surge la figura de Ludwig Boltzmann quien se plantea dos preguntas fundamentales:

- i) ¿Es posible formular una teoría cinética que permita explicar los fenómenos térmicos y mecánicos de los gases en términos del concepto de una función de distribución?
- ii) ¿Hay una relación bien definida entre la termodinámica (fenomenología) y la teoría cinética (microscopía)?

La respuesta de Boltzmann a estas preguntas constituye, aún después de muchos años, la más completa que se ha dado y que, hasta la fecha, no hemos podido substancialmente mejorar. En 1872 publica su trabajo "Estudios posteriores sobre el equilibrio térmico de moléculas gaseosas", en el cual además de mostrar su familiarización con las ideas de Clausius y Maxwell, expone su inquietud por poder conciliar los aspectos macro y microscópicos de la teoría mecánica del calor. Y esta conciliación la quiere establecer a través del concepto de la función de distribución de las moléculas que componen a un gas.

En seguida da otro paso gigantesco al reconocer que la interpretación de las leyes fenomenológicas a partir de las dinámicas requiere forzosamente de substituir el conocimiento detallado de las segundas por una hipótesis ajena a la dinámica, es decir, por una hipótesis probabilística. Finalmente reconoce que si el estado del gas que se quiere describir es uno fuera de equilibrio, la función de distribución no puede ser la distribución de Maxwell.

En base a estas ideas se propone, primero, dar una fundamentación a la segunda ley de la termodinámica para sistemas cerrados y segundo, encontrar la ecuación que describe la evolución temporal de la función de distribución definida.

El "teorema H" de Boltzmann, fue motivo de grandes controversias entre el autor y la escuela de Berlín de la que destacados exponentes como Zermelo y Loschmidt objetaban su interpretación.

Conviene subrayar que si H se identifica como el negativo de la entropía del sistema, la ecuación de Boltzmann puede entenderse como una generalización de la segunda ley de la termodinámica.

De lo anterior es inmediato que para evaluar  $dH/dt$  es necesario conocer la ecuación de evolución de  $f(x,t)$ . Boltzmann resolvió este problema de manera completamente intuitiva. El número total de puntos representativos de las moléculas que constituyen el gas no pueden crearse ni aniquilarse y por lo tanto la variación total de  $f$  en el tiempo, igual a la suma de las variaciones por arrastre de/y por colisiones entre las moléculas, debe ser igual a cero. Más aún, para evaluar el cambio en  $f$  por colisiones substituye la dinámica molecular por una hipótesis probabilística, consecuente con su conceptualización del problema. Dicha hipótesis conocida como la hipótesis sobre el número de colisiones establece que dos moléculas cualesquiera del gas al sufrir una colisión lo hacen de manera

tal que la presencia de una en un punto dado del espacio no afecta la presencia simultánea de la segunda, y que las velocidades de las respectivas moléculas no se ven afectadas por esta concurrencia simultánea. En el lenguaje moderno de la teoría de las probabilidades, la segunda parte de la hipótesis supone que las velocidades son estocásticamente independientes. Esto le permite a Boltzmann escribir su famosa ecuación de la teoría cinética de los gases.

Aunque transcurrieron muchos años entre los descubrimientos de Boltzmann y su aceptación, que fue posterior a su suicidio en 1906, los últimos años de su vida los dedicó Boltzmann a convencer, fundamentalmente, a la escuela alemana de energeticistas encabezada por Mach y Ostwald y a otros que se oponían a teorías microscópicas de la materia, de la validez de sus resultados. Sin embargo la solución de la ecuación de Boltzmann tuvo que esperar hasta 1912 cuando D. Hilbert se interesó en esta ecuación como un caso típico de ecuaciones integrales, tema al que había dedicado muchos años de su vida y propuso un método general para resolverla.

Este método fue adaptado particularmente a la ecuación de Boltzmann de la teoría cinética por D. Enskog en 1917 de manera de poder evaluar las integrales. La esencia del método fue descubierta simultáneamente por S. Chapman que veía la forma de resolver sistemáticamente la ecuación de transporte de Maxwell. Este método se conoce ahora, injustamente, como el método de Chapman y Enskog (el nombre de Hilbert debería incluirse) y con él es posible deducir de las ecuaciones de conservación, las ecuaciones de la hidrodinámica clásica, y la ecuación de Fourier para la conducción del calor.

## ***2.- Teorías actuales sobre la naturaleza de la materia.***

Debido a razones tradicionales e históricas que se remontan a principios de siglo, el planteamiento de la enseñanza de la física y de la Química quedó congelada en los años veinte del siglo XX, dividida en varias áreas o núcleos (mecánica, calor o termodinámica, sonido u ondas, óptica y electromagnetismo) permaneciendo así con solo pequeños cambios hasta principios de los años setenta, que se comenzó a reconocer que la profunda revolución conceptual y experimental sufrida por la física durante la primera mitad del siglo XX, tenía que ser incorporada a la enseñanza.

Como resultado se añadieron algunas de las nuevas ideas de la física, lo que se conoció como Física Moderna la mayoría de las veces como una nueva "parte" tratada al final del curso si había tiempo suficiente y generalmente consistía en una breve mención de unos pocos temas (Ley de Planck de la radiación, teoría de Bohr del átomo, radiactividad, y teoría cuántica de la materia en cursos superiores).

Este proceso dio la falsa impresión de que había dos físicas, una clásica y una moderna, mientras que la realidad es que hay una única física, con un único tema de estudio, el mundo físico. (M. Alonso, 1992)<sup>15</sup>.

Actualmente seguimos utilizando esa distinción entre física clásica y moderna como se muestra, incluso en el anunciado de los núcleos conceptuales del temario y es que uno, se siente fuertemente presionado a decir a los alumnos, como distinguir entre las dos físicas. Para ello podríamos decir, que la física clásica es la que trata sobre fenómenos para los cuales los valores de la constante de Planck y de la velocidad de la luz son irrelevantes porque las velocidades y las energías son pequeñas o que el número de partículas implicadas es tan

<sup>15</sup> Marcelo Alonso Revista Española de Física. 1992.

grande que la cuantización de la energía o del momento angular no aparecen, y la física moderna es la que trata sobre fenómenos para los cuales los valores de la velocidad de la luz y de la constante de Planck son críticos. Sin embargo debe reconocerse que hay diferencias y conexiones más profundas entre las dos físicas incluyendo como tratar el espacio, el tiempo, la materia y la energía.

Alonso aconseja sustituir los términos "clásica" y "moderna" por "newtoniana", "relativista", y "cuántica".

Deberemos dejar claro a nuestros alumnos que:

- ✦ Hay dos niveles de descripción de la Naturaleza.

Uno **macrofísico**, global, que describe el mundo que percibimos directamente, ayudándose de conceptos como presión, temperatura, calor, etc., y que corresponde a la física Newtoniana-Maxwelliana.

El otro **microfísico**, el campo de la física cuántica, utilizando nociones tales como átomo, molécula, radiación.

- ✦ Hay dos métodos complementarios para describir los fenómenos naturales.

Uno utiliza entes localizados o partículas es decir bolas, moléculas, átomos, etc.

El otro utiliza entes extensos o campos; se aplica para describir las interacciones fundamentales (gravitatorias, electromagnéticas) incluyendo ondas como mecanismo general para transmitir energía y momento.

La descripción usada en cada caso depende del fenómeno analizado, y del aspecto del fenómeno que nos interesa resaltar.

- ✦ Las interacciones rigen el comportamiento de la Naturaleza.

Los cuerpos interaccionan entre ellos. Hasta el momento actual solamente se han detectado cuatro formas de interacción o en el lenguaje habitual, cuatro fuerzas naturales, cuyas características dependen del tipo de cuerpos en presencia.

Posiblemente la más conocida sea la **fuerza de atracción gravitatoria** descubierta por Newton en el siglo XVII. Se trata de una fuerza que afecta sin excepción a todo lo existente, incluso a algo tan intangible como la luz, aunque este último fenómeno solamente se conoce desde los años veinte, como una consecuencia de las teorías de Einstein. (Demostrado por Eddington al observar una estrella que debería estar oculta por un eclipse total de sol).

Otra fuerza que afecta a nuestras vidas es la **fuerza electromagnética**. Un aspecto importante de esta fuerza es que originariamente aparecía desdoblada en dos: la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. Sin embargo los trabajos realizados por Oersted, Faraday y Maxwell, entre otros, en los dos primeros tercios del siglo XIX demostraron que eran dos aspectos de una sola fuerza, y produjeron una gran unificación.

La tercera fuerza fundamental que aparece en la naturaleza se llama, curiosamente, **fuerza débil**, aun siendo comparativamente de una intensidad muy superior a la electromagnética y por supuesto a la fuerza gravitatoria. Fue descubierta en el siglo XX. Esta fuerza solo actúa a distancias extremadamente cortas, del orden de las distancias subatómicas. En las dos últimas décadas se ha podido demostrar que, en el marco de la mecánica cuántica, la fuerza débil y la fuerza electromagnética son dos manifestaciones diferentes de una sola fuerza. Esta nueva fuerza se ha denominado **fuerza electrodebil**, dando lugar así a una situación similar a la que ocurrió con la electricidad y el magnetismo. Habría que decir

rigurosamente hablando, ya no hay cuatro fuerzas fundamentales, sino solamente tres.

Finalmente existe una cuarta fuerza que se denomina **nuclear fuerte**, que es la responsable de la atracción entre los componentes del núcleo atómico, y con una intensidad mucho mayor que las anteriores.

En los últimos tiempos se ha impuesto una teoría cuántica, denominada cromodinámica cuántica, según la cual los componentes del núcleo atómico están formados por partículas más pequeñas llamadas quarks, que interactúan entre sí mediante la fuerza fuerte.

Actualmente se está trabajando en la posible unificación de todas las interacciones.

Probablemente sea pronto considerada como la ley más importante descubierta en el siglo XX: que todas las leyes de la Física que describen el comportamiento del Universo, cambian cuando lo hace el rango de energías a las que se realizan las observaciones. Parece ser que hay un rango de energías elevadísimas (del orden de las que imperaban poco después del big-bang) a las que todas las leyes de la Naturaleza pueden ser descritas con una sola teoría; la búsqueda **Teoría de la Unificación**. Teoría que unifica la interacción gravitatoria a la electromagnética fuerte y débil.

Si no cambian los pronósticos actuales ésta podría ser "**La Teoría M**" o "**Teoría de Membranas**" que no es más que una generalización de la Teoría de las Supercuerdas.

- ⚡ La física no es un compartimento cerrado, concluido, sino abierto e inconcluso que tiene aun grandes interrogantes sin responder. Por mencionar solo los más conocidos:
  - ¿Cuál es la verdadera edad del Universo?
  - ¿Cuánta materia existe?
  - La teoría nos dice que deben existir los "agujeros negros", pero nadie ha aportado la prueba definitiva todavía.
  - ¿Cuál es la naturaleza de la masa y el tiempo?
  - ¿Cual fue el verdadero origen de la vida?
  - ¿Existen las ondas gravitatorias?
  - Hasta hace unos meses también había que preguntarse ¿Existe el efecto gravitomagnético? Pero ya podemos informar a nuestros alumnos que en efecto existe, porque ha sido demostrado experimentalmente siguiendo la órbita de un satélite artificial por el eminente físico español Juan Pérez Mercader.

## ^ **BIBLIOGRAFÍA**

- ABIMBOLA, I.** The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72 (2). 175-184. 1988.
- ALVAREZ PEREZ V. M.** Argumentación y razonamiento en los textos de física de secundaria. *Alambique* n° 11, pp. 65-74. 1997.
- ANDERS P. y SONNESSA A.** Principios de Química. Limusa-Willey. 1996.
- ANDERSSON, B.** Pupil's conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, pp. 53-85. 1990.
- AUSUBEL, D.** Psicología educativa. Un punto de vista cognitivo. Trillas. México. 1968.
- BENARROCH, A.** Tesis Doctoral "Las explicaciones de los estudiantes sobre las manifestaciones corpusculares de la materia". 1998.
- BROOK Y COL.** Aspects of secondary students understanding of the particulate nature of matter. Clis Project. University of Leeds. Leeds. 1984.
- BROUN T.L. y LEMAY.** Química. 5ªEd. Prentice-Hall. 1993.
- CARAMAZZA, A., MCCLOSKEY, M. Y CREEN, B.** Naïve beliefs in sophisticated subjects: misconceptions about trajectories of objects cognition, 9, pp. 117-123. 1981.
- CARRASCOSA, J. Y GIL, D.** La metodología de la superficialidad y el aprendizaje de las ciencias, Vol 3, (2), pp. 113-12. 1985.
- CASABÓ J. y GISPERT.** Estructura atómica y enlace químico. Reverte. 1996.
- CUBERO, R.** Concepciones alternativas, preconceptos, errores conceptuales... ¿distinta terminología y un mismo significado? *Investigación en la escuela* 23, pp. 33-42. 1994.
- DE VEGA, M.** Nuevas perspectivas del procesamiento de la información *Estudios de psicología*, 22 pp. 3-17. 1985.
- DEVOS, W., VERDONK, A.H.** The particulate Nature of Matter in Science Education and in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, vol.33 n. 6 pp 657-664. 1996.
- DRIVER, R. Y EASLEY, J.** Pupils and paradigms. *Studies in Science Education*, 5, pp. 61-84. 1978.
- DRIVER, R.** Un enfoque constructivistas para el desarrollo del currículo de ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, 6 (2) pp. 109 –120. 1988.
- DRIVER, R., GUESNE, E. y TIBERGHIE, A.** Ideas científicas en la infancia y la adolescencia. Ed. M.E.C.- Morata 1989.

- ERICKSON, G.** Children's viewpoints of heat: A second look. *Science Education*, 64 (3), pp. 323-336. 1980.
- FEINMAN R.** *Electrodinámica cuántica*. Alianza Editorial. 1988.
- FEINMAN R.P.** *Física*. Addison-Wesley Iberoamericana. 1987.
- GAGNE, R. M.** *Las condiciones del aprendizaje*. Aguilar, Madrid.
- GAMOW.G.** *Biografía de la física*. Alianza Editorial.1988.
- GIL, D.** Contribución de la historia y la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (2), pp. 197-212. 1993.
- GIL, D** Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las ciencias*, I (1), pp. 26-3. 1983.
- HARLEN W.** *Enseñanza y aprendizaje de las Ciencias*. Morata- M.E.C.
- HIERREZUELO, J.** *La ciencia de los alumnos*. Laia. 1989.
- HOLTÓN G. Y BRUSH, R.** *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Reverté. 1993.
- JIMÉNEZ, E., SOLANO, I. Y MARÍN, N.** Problemas de terminología en estudios realizados acerca de "lo que el alumno sabe" sobre ciencias *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), pp. 235-245. 1994.
- KELLY.** *The psychology of personal constructs*. Vol 1 y 2. W.W. Norton. Co Inc New York. 1959.
- KUHN, D., AMSEL, E. Y O'LOUGHLIN, M.** *The development of scientific thinking skills*. New York Academic Press. 1988.
- LAHERA J.** *Introducción a la Física Moderna en la Enseñanza Secundaria*. Síntesis. 1995.
- LEMKE J.L.** *Aprender a hablar ciencia: Lenguaje, aprendizaje y valores*. Barcelona Paidós. 1997.
- LLORENS, J.A.** La concepción corpuscular de la materia. Obstáculos epistemológicos y problemas de aprendizaje. *Investigación en la Escuela*, 4, pp. 33-49. 1988.
- LLORENS, J. A.** El proceso de cambio conceptual en la iniciación a la química. La introducción de los conceptos de sustancia pura y cambio. *Revista de educación*, 289, pp. 307-332. 1989.
- MARRO, F.** Aplicabilidad y repercusiones de la obra de Piaget en la práctica educativa. *Infancia y aprendizaje*, 23, pp. 1-21. 1983.

- MASON, S.** Historia de las Ciencias. Alianza Editorial. 1986.
- MEHEUT, M., LARCHER, C., CHOMAT, A.** Modelos de partículas en la iniciación a las ciencias físicas, Enseñanza de las ciencias, 6 (3) pp. 231-239. 1988.
- OSBORNE, R.** El aprendizaje de las Ciencias. Implicaciones de la ciencia de los alumnos. Narcea. 1991.
- OTERO, J.** El aprendizaje de los conceptos científicos en los niveles medio y superior. Revista de Educación, 278, pp. 39-66. 1985.
- OTERO, J.** La comprensión y la producción de la Ciencia: La elaboración en el aprendizaje de la Ciencia Escolar. Enseñanza de las Ciencias, 7 (3), pp. 223-228. 1989.
- PERAN C.** Cómo funciona y de qué está hecho el Mundo. Comares. 1994.
- PIAGET, J.** La teoría de Jean Piaget. Infancia y aprendizaje, monografía 2, pp. 13-54. 1981.
- POSADA, J. M.** Concepciones de los alumnos de 15 a 18 años sobre la estructura interna de la materia en el estado sólido. Enseñanza de las Ciencias, 11 (1), pp. 12-19. 1993.
- POZO, J.** Aprendizaje de las ciencias y pensamiento casual. Visor, Madrid. 1987.
- RODRIGO, M. J.** El hombre de la calle, el científico y el alumno ¿un solo constructivismo o tres? Investigación en la escuela nº 23, pp. 7-14. 1994.
- SANMARTÍ, N E IZQUIERDO, M.** Reflexiones en torno a un modelo de ciencia escolar. Investigación en la escuela, 32, pp. 51- 62. 1997.
- SEBASTIA, J.** Fuerza y Movimiento. La interpretación de los estudiantes. Enseñanza de las Ciencias, 2 (3), pp. 161-169, 1984.
- SHAYER, M. Y ADEY P.** La ciencia de enseñar ciencia. Narcea, Madrid. 1984.
- SOLBES, J., CALATAYUD, M., CLIMENT J Y NAVARRO J.** Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. Enseñanza de las Ciencias, 5(3) pp. 189-195. 1987.
- TIPLER P.A.** Complementos de la Física. Reverté. 1980.
- TIPLER P.A.** Física. Reverté. 1993.
- TOULMIN, S.** La comprensión humana: El uso colectivo y la evolución de los conceptos. Alianza Universal, Madrid. 1977.
- WHYTTE K, DAVIS, PECK L.** Química General, 5º Ed. McGraw Hill. 1998.