

LA NOCIÓN DE MODELO EN CIENCIAS

En el estado actual de la investigación en enseñanza de ciencias, la opinión acerca de la relevancia de las cuestiones epistemológicas ha cobrado un consenso prácticamente unánime. Numerosos trabajos destacan la necesidad de suministrar a la educación científica una sólida fundamentación filosófica basada en las principales teorías epistemológicas vigentes en el panorama de la filosofía de la ciencia contemporánea. En general, los autores coinciden en señalar la importancia de reemplazar la visión simplista de la ciencia como disciplina objetiva, ascética y productora de verdades definitivas, por una concepción mucho más compleja pero, a la vez, más rica, según la cual la ciencia, en tanto actividad profundamente humana, procede por caminos que distan de ser rectos y se encuentra fuertemente

enraizada en el contexto histórico y cultural de su época. Sobre la base de la adhesión a esta perspectiva, en el presente artículo se intentará poner de manifiesto que la carencia de una adecuada formación epistemológica por parte del docente -carencia que conduce a una concepción simplista y acrítica de la actividad científica- puede originar profundas dificultades a la hora de la práctica efectiva de la enseñanza de ciencias. En particular, se destacará el papel central que cobra la noción de modelo en el pensamiento científico desde la Modernidad, subrayando la relación entre la comprensión de este concepto y la superación de posiciones anacrónicas tanto en el ámbito de la historiografía de la ciencia como en el de la epistemología.

Olimpia Lombardi

UNIVERSIDAD DE BUENOSAIRES

EL "SENTIDO COMÚN EPISTEMOLÓGICO"

Así como pueden detectarse ideas precientíficas en el área de la física o de otras disciplinas científicas, también puede comprobarse que los alumnos se enfrentan al aprendizaje de ciencias desde ciertos preconceptos acerca de la propia actividad científica, su evolución y sus resultados. Este "sentido común epistemológico" combina elementos del empirismo-inductivismo del siglo XIX con aspectos del positivismo lógico de principios del siglo XX; pero, en general, se manifiesta como una concepción mucho más ingenua que las doctrinas epistemológicas en las que encuentra sus raíces. Según esta perspectiva acrítica, la observación imparcial de los hechos es la fuente de todo conocimiento; tales hechos constituyen la base neutral sobre la que se funda la ciencia; la actividad científica consiste en la aplicación sistemática del "método científico", comúnmente asimilado al método inductivo, que permite obtener generalizaciones empíricas a partir de los datos observados; dichas generalizaciones se convierten en leyes al ser verificadas empíricamente, y a partir de ese momento permiten, por vía deductiva, la predicción de fenómenos particulares. A su vez, la ciencia es concebida desde una posición realista ingenua: las teorías científicas describen el mundo tal como es en sí y, por tanto, son descubiertas y no creadas ni construidas; en consecuencia, la ciencia es objetiva y neutral, independiente de factores histórico-sociológicos; su evolución es lineal y acumulativa, y progresa siempre hacia su meta, que consiste en el descubrimiento de las teorías verdaderas (una discusión crítica de esta posición puede leerse en Palma (1997), en el Vol.I, N°3 de esta misma publicación).

La disolución de estos preconceptos epistemológicos en favor de una concepción mucho más rica y compleja de la actividad científica no es tarea fácil, dados los múltiples estímulos que concurren a generarlos. Pero, sin



duda, el primer paso debe consistir en la superación de tales preconceptos por parte de los propios docentes de ciencias. Lamentablemente, este "sentido común epistemológico" se encuentra tan arraigado en la comunidad científica y educativa que suele manifestarse recurrentemente en numerosas obras tanto de formación como de divulgación científica. Así, por ejemplo, en el muy utilizado texto de Young sobre mecánica y calor, el autor afirma: **"El proceso de establecer una ley general en función de un número limitado de observaciones se denomina inducción. Una vez establecida la ley general, puede utilizarse para predecir los resultados que se vayan a efectuar posteriormente, mediante un proceso de deducción. [...] El punto fundamental es que el proceso de desarrollo de una nueva teoría física, es siempre un proceso de dos direcciones que empieza y acaba con observaciones de los fenómenos físicos"** (Young, 1964, Cap.1). También en nuestro medio pueden hallarse ejemplos de esta posición; por ejemplo, en su texto de física elemental Fernández Serventi asegura que **"la física, siendo una ciencia, emplea el método científico experimental inductivo"**, el cual se basa en la observación, que **"consiste en detener la atención en el fenómeno sin modificar las condiciones en que el mismo se produce"**, y en la experimentación, que **"es la repetición del fenómeno variando, si es necesario, las circunstancias que lo acompañan"** (F. Serventi, 1982, pp.11-12).

En el ámbito de la historia de la ciencia, estos preconceptos epistemológicos conducen al denominado "enfoque *whig*" (Butterfield, 1951), que consiste en imponer al pasado los patrones del presente y evaluar la ciencia de otras épocas a la luz y con referencia al conocimiento actual. Desde este punto de vista, en una conocida publicación sobre educación en ciencias Robert Cohen afirma: **"La ciencia se acumula, crece. Esto la contrasta tajantemente con otros aspectos de la cultura humana. Una escultura de Miguel Angel, creada en el siglo XVI, no es inherentemente menos hermosa que una de Henry Moore hoy. [...] Pero la visión científica de Galileo y Newton es inherentemente menos comprensiva, menos exitosa, menos verdadera, que la de Einstein y Planck; y la sabiduría de Pitágoras y Aristóteles es, a su vez, del mismo modo menos verdadera que la de Galileo"** (Cohen, 1997, p.401). Este enfoque *whig* es el que, carente de perspectiva histórica, presenta a Aristóteles como un pensador racionalista y ajeno a la observación, y a Galileo como el héroe moderno que disipa las tinieblas aristotélicas exclusivamente por medio del método empírico. Nuevamente, Young nos proporciona un excelente ejemplo; considerando que el método empírico conduce inexorablemente a las verdades definitivas de la ciencia, el autor infiere que la única explicación de los "errores" de Aristóteles debe fundarse en su extremo racionalismo: **"los filósofos de la antigua Grecia confiaban en sus esfuerzos en busca de la verdad, más en la razón que en la observación [...]. Aristóteles consideraba que la ayuda que prestaban los experimentos para entender el mundo físico era pequeña"** (Young, 1964, Cap.1).

Pero, ¿qué sentido tiene para el docente poseer conocimientos epistemológicos?, ¿en qué aspecto se relacionan estas consideraciones historiográficas y epistemológicas con la práctica efectiva de la enseñanza de ciencias?

GALILEO Y EL PÉNDULO IDEAL

En su artículo "*Galileo's Pendulum and the Objects of Science*", Michael Matthews (1987) relata un episodio histórico acerca de la formulación de la isocronía del péndulo. Si bien Galileo consideraba su "descubrimiento" como esencial para el conjunto de su nueva física, la isocronía del péndulo fue vigorosamente resistida por Guidobaldo del Monte, protector del propio Galileo

y uno de los mayores expertos en mecánica del siglo XVII. Del Monte insistía que los péndulos, en realidad, no son isócronos: los más livianos y los más pesados no tienen el mismo período, como así tampoco los de diferente longitud; además, todos los péndulos terminan por detenerse luego de un número suficiente de oscilaciones. Galileo replicó que tales resultados se referían únicamente a péndulos reales, pero que si se estudiasen los péndulos ideales, donde la fricción, la resistencia del aire y el peso de la cuerda no existen, entonces ciertamente se encontraría que son isócronos. Tal argumento nunca fue aceptado por del Monte, convencido de que la física debía versar sobre el mundo real y no sobre un supuesto mundo ideal sin resistencias ni rozamientos.

Este episodio de la historia de la ciencia puede servir para reflexionar acerca del problema aquí planteado: en qué medida la carencia de una adecuada formación epistemológica por parte del docente de ciencias puede originar profundas dificultades en la enseñanza. Numerosos trabajos acerca de preconcepciones en física (por ejemplo, *cfr. Driver et al., 1985*) ponen de manifiesto que una de las ideas precientíficas más profundamente arraigadas en los estudiantes es la que se refiere a la estrecha relación causal entre fuerza y movimiento: la acción de fuerzas es lo que causa el movimiento de los cuerpos. Algunos autores presentan tal preconcepción bajo la forma "movimiento implica fuerza" (Dykstra, 1992) a fin de expresar la idea según la cual, si existe movimiento, cualquiera sea su tipo, es porque ha existido necesariamente una fuerza que lo ha producido. A partir de este preconcepción básica de fuerte resonancia aristotélica, los estudiantes, en general de un modo espontáneo e incluso inconsciente, suelen extraer diversos corolarios respecto de la relación entre fuerza y movimiento, como, por ejemplo: a) si no hay acción de fuerzas, no hay movimiento; b) la fuerza tiene la misma dirección y sentido que el movimiento en la medida en que es su causa; c) los cuerpos pesados caen más rápido que los más livianos; d) los cuerpos que se dejan caer desde un móvil, caen siempre "verticalmente".

¿Con qué recursos cuenta el docente que, con una visión acrítica de la ciencia, debe enfrentarse a tales preconcepciones?, ¿cómo intentará lograr la comprensión, por ejemplo, del principio de inercia? Desde su ingenuidad epistemológica pretenderá que sus alumnos "observen" la manifestación empírica del principio y, a partir de la paciente observación, consigan inferirlo inductivamente. Pero el mundo de nuestra experiencia cotidiana es demasiado reticente a brindar tales resultados: como Aristóteles, vivimos en un *plenum* donde los cuerpos más pesados caen efectivamente más rápidamente que los más livianos; los objetos que observamos diariamente requieren una fuerza para mantener su movimiento y acaban por detenerse cuando retiramos tal fuerza; jamás observamos movimientos lineales que duren indefinidamente. Frente a tales dificultades, el docente pondrá en funcionamiento todo su arsenal de aparatos especialmente diseñados para la ocasión; así los estudiantes se internan en un extraño mundo de carriles de aire y tubos de vacío, donde las cosas comienzan a comportarse aproximadamente, pero sólo aproximadamente, como sostiene el profesor. Finalmente, y en el más favorable de los casos, el docente logrará convencer a sus alumnos de la validez del principio de inercia en las experiencias realizadas en el laboratorio. El estudiante se convierte, así, en el habitante de un mundo escindido en dos ámbitos estancos entre sí: el mundo cotidiano donde siguen siendo válidos sus preconcepciones, y el mundo de la física, del laboratorio, donde con mucho esfuerzo es posible "observar" las manifestaciones de los principios newtonianos. En otras palabras, el estudiante de física termina por adherir a una nueva versión de la vieja doctrina medieval de la doble verdad, donde ahora la fe no es ya el camino a la verdad revelada, sino debe conducir a las verdades definitivas de la ciencia que escapan a la experiencia cotidiana.



Si bien esta descripción puede parecer desmesurada, lamentablemente tal situación se repite recurrentemente en los cursos de física. La perspectiva ingenua del docente revela su incapacidad para reconocer la ruptura epistemológica con el sentido común que implica el pensamiento científico. Los inconvenientes que surgen en la enseñanza derivan, en este caso, de desconocer el papel central que, desde la Modernidad, cumple la modelización en física. Sólo una visión simplista y acrítica de la ciencia y de su historia permite adjudicar a del Monte una ceguera empírica al negar la isocronía del péndulo: su concepción se encontraba más ligada a la paciente observación de los hechos que la nueva visión de Galileo basada en inexistentes péndulos ideales sin fricción ni resistencia.

"La definición precisa del concepto de modelo en ciencias formales debe distinguirse de la noción de modelo en ciencias fácticas."

LOS SENTIDOS DE LA NOCIÓN DE MODELO EN CIENCIAS

Entre los científicos, tanto provenientes del ámbito de las ciencias fácticas como de las ciencias formales, es sumamente frecuente la referencia a los modelos de los cuales hacen uso sus respectivas disciplinas. Pero, también frecuentemente y sin advertirlo, los científicos suelen utilizar la misma palabra con diferentes significados. Por ello es conveniente prestar atención al sentido con el que el término "modelo" es utilizado en ciencias y, en primer lugar, distinguir el significado que adopta en ciencias formales y en ciencias fácticas.

En ciencias formales, el término "modelo" posee un significado claro y preciso, ligado a la noción de sistema axiomático, central en la actual concepción de la matemática. Durante el siglo XX se ha finalmente abandonado la tradicional caracterización de la matemática como "ciencia de lo cuantitativo", para pasar a concebirla como una disciplina que estudia la estructura y propiedades de cierto tipo de sistemas formales denominados "sistemas axiomáticos". Un sistema axiomático es un conjunto de fórmulas o cuasi-enunciados relacionados deductivamente entre sí de acuerdo con un sistema lógico subyacente; su condición de cuasi-enunciados se debe a su carácter puramente sintáctico: al carecer de referente semántico, también carecen de valor de verdad. La estructura deductiva del sistema se organiza a partir de ciertos cuasi-enunciados denominados "axiomas", punto de partida de las derivaciones lógicas; los cuasi-enunciados que resultan de tal proceso deductivo son los llamados "teoremas" del sistema axiomático. (*cfr.* Klimovsky, 1994, Cap.18),

Si bien suelen estudiarse las diferentes propiedades sintácticas de los sistemas axiomáticos, éstos carecen de propiedades semánticas debido a su carácter puramente formal: las nociones de significado y verdad no le son aún aplicables. El aspecto semántico aparece sólo cuando se brinda una interpretación al sistema: interpretar un sistema axiomático consiste en asignar, a cada término no lógico, una referencia perteneciente a algún dominio de entidades (objetos, propiedades, relaciones y funciones) previamente definido. De este modo, los términos adquieren un significado y los cuasi-enunciados se convierten en genuinos enunciados poseedores de valor de verdad, esto es, pasibles de ser verdaderos o falsos. Sólo cuando se ha introducido la dimensión semántica, puede definirse la noción de modelo en ciencias formales: se denomina "modelo" de un sistema axiomático a una interpretación que convierte a los axiomas en enunciados verdaderos; dado que la relación de deducción lógica transmite la verdad, el modelo convertirá en verdaderos también a los teoremas del sistema.

Esta definición precisa del concepto de modelo en ciencias formales debe distinguirse claramente de la noción de modelo en ciencias fácticas, donde su caracterización suele oscurecerse debido a la vaguedad y polisemia

del término correspondiente. Para esclarecer el panorama, conviene comenzar recordando que una teoría científica fáctica es un conjunto de enunciados articulados deductivamente de modo tal que todos los enunciados pertenecientes a la teoría pueden derivarse lógicamente de ciertos enunciados adoptados sin demostración, las hipótesis de partida, con la ayuda de ciertos enunciados singulares, las condiciones iniciales, que brindan la información indispensable sobre el material de trabajo. Las hipótesis de partida identifican la teoría, y de ellas se deducen las llamadas "consecuencias observacionales", enunciados singulares cuyo testeo empírico permite la contrastación de la teoría (*cf.* Klimovsky, 1994, Cap.10).

Pero el sistema real al cual la teoría supuestamente refiere siempre involucra una enorme cantidad de factores, de modo tal que resulta demasiado complejo para su tratamiento pormenorizado, e incluso en algunos casos se torna imposible en la práctica determinar las características de los elementos que lo constituyen. Además, muchos factores suelen ser irrelevantes a la luz de las hipótesis de partida adoptadas, por lo cual pueden ignorarse en el tratamiento del sistema real sobre la base de la teoría en cuestión. Por estos motivos los científicos trabajan con sistemas simplificados e idealizados, que no son más que entidades abstractas en las cuales se consideran como variables sólo los factores relevantes en el sentido indicado, o se suponen ciertas características de los objetos inobservables que componen el sistema. Tales sistemas abstractos son los que suelen denominarse "modelos" del sistema real, por ejemplo, modelo físico o modelo biológico en el caso de corresponder a un sistema físico o a un sistema biológico respectivamente. Así, pues, se "construye" el modelo de un péndulo observable como un péndulo sin rozamiento y con hilo inextensible; o el modelo de un gas empírico como un conjunto de esferas macizas que interaccionan de acuerdo con las leyes del choque elástico.

Esta elucidación del concepto de modelo en ciencias fácticas pone de manifiesto que una teoría científica tendrá como referente directo, no al sistema cuyo comportamiento pretende describir, sino a un modelo de tal sistema. Pero aún cuando la teoría responda correctamente al modelo, su adecuación para ser aplicada al sistema real bajo estudio se evaluará en función de que los resultados deducidos para el modelo se aproximen, dentro de un margen de error considerado aceptable, a los resultados obtenidos empíricamente en el sistema real. Si tal es la situación, se considerará, no sólo que la teoría, en términos popperianos, ha quedado corroborada, sino además que el modelo ha resultado adecuado para describir el fenómeno de interés en el sistema real considerado.

Pero la situación se complica cuando los científicos tienden a utilizar una noción sintáctica de modelo, aún en ciencias fácticas. Una teoría científica fáctica, en tanto conjunto de enunciados, puede ser despojada de su contenido semántico; de tal operación resulta, precisamente, un sistema axiomático. Cuando, como suele suceder, los cuasi-enunciados están constituidos por términos y operaciones provenientes de la matemática y las articulaciones deductivas se basan en razonamientos utilizados en ese mismo ámbito, el sistema axiomático se presenta como una estructura cuyos axiomas son ecuaciones: si los cuasi-enunciados que juegan el papel de condiciones iniciales permiten adjudicar valores a ciertas variables involucradas en la ecuaciones axiomáticas, los teoremas del sistema axiomático permitirán adjudicar un valor a cada una de las variables incógnita. Tales teoremas son, precisamente, los cuasi-enunciados correspondientes a las consecuencias observacionales de la teoría, y el valor obtenido para cada variable incógnita representará, a través de una adecuada interpretación semántica, la magnitud cuantificada de una cierta propiedad del sistema bajo estudio. Esta estructura sintáctica es aquello que, principalmente los físicos -habitados a trabajar

con propiedades cuantificables-, suelen denominar “modelo matemático”, haciendo uso de una acepción del término “modelo” que no coincide ni con su significado en ciencias formales ni con su sentido primario en ciencias fácticas. A su vez, cada modelo matemático así concebido corresponde a alguna teoría matemática -previamente desarrollada o deliberadamente formulada para el caso- en el sentido de incluir términos y formas de inferencia pertenecientes a tal teoría; por ejemplo, el modelo matemático de la mecánica clásica corresponde al cálculo infinitesimal lineal. Por tal razón, en algunos casos se denomina, por extensión, “modelo matemático” de una dada teoría fáctica a la teoría matemática a la cual corresponde el modelo matemático -en sentido restringido- de dicha teoría fáctica. Lo que sucede en muchas ocasiones es que los científicos, en particular los físicos debido al uso permanente que hacen de la matemática, tienden a identificar la teoría fáctica con el modelo matemático a ella asociado. Pero un modelo matemático, en tanto estructura puramente sintáctica que articula cuasi-enunciados carentes de contenido referencial, no constituye aún una teoría fáctica; para convertirse en tal requiere de una interpretación semántica en términos del modelo fáctico correspondiente.

En resumen, al hablar de “modelo” en ciencias fácticas resulta indispensable distinguir tres niveles claramente diferenciados:

- **el sistema real, cuyas regularidades la teoría fáctica pretende describir.**
- **el modelo fáctico, sistema abstracto que resulta de un proceso de modelización.**
- **el modelo matemático, que constituye la estructura puramente sintáctica de la teoría fáctica en cuestión.**

Cuando una teoría fáctica es contrastada y no se obtienen los resultados previstos por ella, el problema puede deberse, no únicamente a que la teoría no describe adecuadamente el modelo fáctico -físico, biológico, etc.-, sino a la no pertinencia del modelo fáctico respecto del sistema real: tal vez, en el péndulo no pueda, en ciertas circunstancias, desprejarse el rozamiento; o las moléculas de un gas, bajo algunas condiciones, no puedan ser tratadas como esferas macizas; o quizás el modelo fáctico resulta totalmente inadecuado respecto del sistema real bajo cualquier circunstancia.

LOS MODELOS EN CIENCIAS FÁCTICAS

Sin pretender brindar una clasificación exhaustiva, pueden mencionarse diversas operaciones conceptualmente distinguibles que intervienen en la construcción del sistema abstracto que constituirá un modelo del sistema real bajo estudio:

- **Recorte del sistema:** se ignoran ciertos factores que intervienen en el sistema real debido a que se los considera irrelevantes a la luz de las hipótesis de partida de la teoría; por ejemplo, el color de un cuerpo respecto de su movimiento descrito por la mecánica clásica.
- **Simplificación del sistema:** se ignoran ciertos factores que intervienen en el sistema real debido a que se considera despreciable su incidencia frente a la de otros factores en la ocurrencia del fenómeno bajo estudio; por ejemplo, el efecto del rozamiento en el movimiento de un objeto sobre un carril de aire. Tanto esta operación como la anterior limitan el número de variables utilizadas

en la descripción del sistema real, así como de las relaciones establecidas entre ellas.

- **Identificación por caso límite:** se asimilan fenómenos en principio diferentes sobre la base de concebir uno de ellos como "caso límite" del otro; ejemplo de este caso es el recurso de Galileo de identificar el movimiento de caída libre de una bola con su movimiento de caída al rodar por un plano inclinado, para el caso límite de una inclinación del plano de 90° .
- **Postulación de entidades ideales:** se representan ciertos elementos del sistema real por medio de entidades abstractas, generalmente de carácter matemático o geométrico, a fin de facilitar la descripción del fenómeno de interés; ejemplo de este caso es la postulación de masas puntuales, planos infinitos, etc.
- **Postulación de estructuras:** cuando en la práctica resulta imposible determinar la naturaleza y propiedades de los elementos del sistema real bajo estudio, se postula una cierta estructura interna y se definen las relaciones entre los elementos de tal estructura; éste es el caso del estudio de las propiedades de los gases por medio de la Teoría Cinética.

Esta diversidad de operaciones, que generalmente se combinan en la construcción de un modelo en ciencias fácticas, pone de manifiesto la relación entre el modelo y el sistema real al que pretende representar: no se trata de una relación "pictórica", donde a cada elemento del modelo corresponde un elemento del sistema real. Por el contrario, entre ambos se establece una relación compleja, de sistema a sistema, donde algunas variables del sistema real pueden no aparecer en el modelo (por ejemplo, como resultado del recorte y la simplificación del sistema real) y, a su vez, algunas variables del modelo pueden no poseer su correlato en el sistema real (éste es el caso típico de modelos que introducen entidades teóricas, esto es, no directamente observables, cuyas propiedades no pueden ser determinadas por vía empírica en el sistema real; recuérdese, por ejemplo, el caso de posición y velocidad de las partículas en los modelos cinéticos de los gases). El único caso en el que debe mantenerse una correspondencia biunívoca entre variables del modelo y del sistema real es el caso de las variables que adquieren su valor por medición; es precisamente la determinación empírica del valor de tales variables lo que permite evaluar, no sólo la "bondad" de la teoría, sino también la adecuación del modelo respecto del sistema real en el aspecto que se pretende describir. Esta correspondencia holística entre modelo y sistema real se manifiesta más claramente en formulaciones de mayor nivel teórico; considérese, por ejemplo, en mecánica cuántica la noción de estado cuántico y la compleja relación entre operadores, "observables", y magnitudes medidas.

Si bien la modelización es un recurso sistemáticamente utilizado en el ámbito de la física, en absoluto es exclusivo de esta disciplina. También se construyen modelos en biología, cuando por ejemplo se describe el aparato circulatorio como un sistema hidráulico accionado por una bomba; o en sociología, cuando se privilegian ciertas relaciones entre individuos o se conciben ciertas instituciones cumpliendo roles específicos en la sociedad; o en las recientes neurociencias, cuando se intenta simular algunas actividades cerebrales, como la memoria, por medio de circuitos eléctricos complejos.

Una cuestión que merece destacarse es que no existe "el" modelo de un dado sistema real, sino una multiplicidad de modelos según los factores considerados relevantes, la eventual postulación de entidades ideales y de estructuras, etc. La elección del modelo a utilizar depende del interés que

No existe "el" modelo de un sistema real, sino una multiplicidad de modelos según los factores considerados relevantes

mueva al científico en cada caso particular; por ejemplo, tal vez pueda desprenderse el efecto gravitatorio de la luna si se desea describir la órbita terrestre alrededor del sol, pero no puede hacerse lo mismo si lo que se pretende explicar es el comportamiento de las mareas; por ejemplo, es legítimo describir el movimiento de un cuerpo como el de una masa puntual cuando sus dimensiones son inferiores a la precisión de los instrumentos utilizados para determinar longitudes. Por lo tanto, dado un cierto sistema real no es posible considerar uno de sus modelos como "mejor" que otro en un sentido absoluto, sino sólo en relación a los objetivos específicos de la particular investigación que se lleva a cabo. Existen, sí, modelos más complejos que otros, en el sentido de involucrar mayor cantidad de factores o estructuras más articuladas; pero esto no implica que deba preferirse el modelo de mayor complejidad en todos los casos; por el contrario, en muchas situaciones los modelos más sencillos permiten describir de un modo conceptualmente más claro y preciso ciertos aspectos del sistema real bajo estudio.

La noción de modelo en ciencias fácticas, tal como aquí ha sido elucidada, contribuye a comprender mejor en qué sentido puede hablarse de los límites de aplicabilidad de una teoría científica. Sostener que la mecánica de partículas es falsa frente a la mecánica de cuerpos rígidos, o que la mecánica clásica ha quedado invalidada desde el surgimiento de la teoría relativista, sugiere la idea de la necesidad de abandonar ciertas formulaciones teóricas en favor de otras más fieles a la realidad. Pero esto no refleja la práctica efectiva de la ciencia. Supóngase un único sistema real representado por medio de dos modelos, a cada uno de los cuales se aplica una teoría científica diferente; nada impide que, dentro de la precisión requerida, ambas teorías puedan resultar empíricamente corroboradas a través de sus respectivos modelos; en tal caso, el científico tenderá a trabajar con la teoría y el modelo más sencillos; por ejemplo, ningún físico recurre a modelos relativistas para representar sistemas abordables mediante la mecánica clásica. Por lo tanto, la elección del par modelo-teoría a utilizar en cada situación depende de la precisión con la que se desee trabajar, lo cual, a su vez, es función de los objetivos de cada investigación particular. Una teoría inaplicable a ciertos modelos puede, no obstante, continuar siendo fructíferamente utilizada para otros modelos de un modo totalmente legítimo desde el punto de vista científico. La comprensión de este aspecto de la práctica científica conduce a abandonar la perspectiva ingenua que tiende a identificar las limitaciones de una teoría con "errores" a eliminar por medio de la aplicación de una teoría "mejor". Los límites de aplicabilidad de las teorías científicas vigentes deben considerarse como una de sus características constitutivas, y no como un "defecto" a ser superado con la evolución ulterior de la ciencia.

En conclusión, y volviendo al caso de la enseñanza de ciencias, suponer, por ejemplo, que un estudiante acabará infiriendo los principios newtonianos en el laboratorio, jugando con carriles de aire y tubos de vacío y observando pacientemente, implica ignorar el concepto de modelización y olvidar que la semántica de una teoría científica no fija como referentes de sus términos los objetos percibidos por observación directa; por el contrario, el nexo entre teoría y realidad siempre se encuentra mediado por algún modelo. Incluso en el caso de las teorías científicas más ligadas a nuestra percepción cotidiana, como la mecánica clásica, la ontología que constituye su referencia no está conformada por los objetos empíricamente observables, sino por un mundo idealizado de masas puntuales, sin fricción y con fuerzas perfectamente balanceadas. Es precisamente contra este mundo ascético que se levantó la protesta romántica de Goethe, cuando opuso su propia teoría de los colores basada en la sensación a la fría teoría corpuscular de Newton. Tal crítica lograba comprender lo que el docente epistemológicamente ingenuo no consigue captar: la profunda ruptura epistemológica respecto de la percepción

empírica que implica la física newtoniana en particular y la ciencia en general.

MODELOS, EPISTEMOLOGÍA E HISTORIOGRAFÍA

Los trabajos actuales en investigación en didáctica de la ciencia suelen coincidir en su reconocimiento de la importancia de contextualizar los conceptos científicos en el marco histórico de su formulación, así como de la necesidad de complementar la enseñanza de contenidos con una reflexión epistemológica acerca de la propia actividad científica. La comprensión del papel central que juega la noción de modelo en ciencias fácticas resulta relevante también en este sentido, en la medida en que contribuye a abandonar las perspectivas epistemológicas e historiográficas acríticas que continúan manifestándose recurrentemente en la enseñanza de ciencias.

En primer lugar, la consideración de los modelos como mediadores indispensables entre teoría y realidad permite erradicar la visión realista ingenua acerca de la ciencia, según la cual la teoría científica es concebida como una "copia" de la realidad y su verdad se evalúa en función de la correspondencia entre ambas. Esto no significa que deba abandonarse todo tipo de realismo en favor de posturas instrumentalistas más o menos extremas. Quien prefiera mantener una visión realista de la producción científica podrá considerar que los modelos más complejos y que brindan una mayor precisión predictiva son aquellos que mejor describen una realidad independiente y objetiva. Pero la adopción de esta forma de realismo epistemológico no permite desconocer que la práctica efectiva de la ciencia es una compleja actividad que complementa, en un permanente juego dialéctico, postulación de teorías y construcción de modelos.

En segundo lugar, la noción de modelo ayuda a concebir el devenir histórico de la ciencia como un proceso que, lejos de ser lineal y acumulativo, presenta rupturas radicales irreductibles. No es necesario abandonar el realismo epistemológico y adoptar la tesis kuhniana de la inconmensurabilidad para reconocer en tales rupturas una profunda modificación de los modelos generales a través de los cuales, en cada época, la comunidad científica concibe la realidad, modelos como aquellos que se refieren a la estructura última de la materia o a la naturaleza y las propiedades del espacio y del tiempo.

En segundo lugar, la noción de modelo ayuda a concebir el devenir histórico de la ciencia como un proceso que, lejos de ser lineal y acumulativo, presenta rupturas radicales irreductibles. No es necesario abandonar el realismo epistemológico y adoptar la tesis kuhniana de la inconmensurabilidad para reconocer en tales rupturas una profunda modificación de los modelos generales a través de los cuales, en cada época, la comunidad científica concibe la realidad, modelos como aquellos que se refieren a la estructura última de la materia o a la naturaleza y las propiedades del espacio y del tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Butterfield, Herbert (1951), *The Whig Interpretation of History*, Charles Scribner's Sons, New York.

Chalmers, Alan F. (1976), *What is this thing called science?*, University of Queensland Press, Brisbane. Versión castellana: *¿Qué es esa cosa llamada Ciencia?*, Siglo XXI, Madrid, 1991.

Cohen, Robert S. (1994), "Individuality and Common Purpose: The Philosophy of Science", *Science & Education*, Vol.3, N°4, pp. 393-407. Reimpresión del original aparecido en *The Science Teacher*, Vol.31, N°4, 1964.

Driver, Rosalind & Guesne, Edith & Tiberghien, Andrée (1985), *Children's Ideas in Science*, Open University Press: Milton Keynes. Versión castellana: *Ideas Científicas en la Infancia y la Adolescencia*, Morata, Madrid, 1989.

Dykstra, Dewey (1992), "Studying Conceptual Change: Constructing New Understandings", en Duit et al. eds., *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, Institute for Science Education, University of Kiel, Kiel.

Fernández Serventi, Héctor (1982), *Física 1*, Losada, Buenos Aires.

Hanson, Norwood R. (1958), *Patterns of Discovery*, Cambridge University Press,

Cambridge. Versión castellana: *Patrones de Descubrimiento. Observación y Explicación*, Alianza, Madrid, 1977.

Hempel, Carl G. (1966), *Philosophy of Natural Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. Versión castellana: *Filosofía de la Ciencia Natural*, Alianza, Madrid, 1987.

Klimovsky, Gregorio (1994), *Las Desventuras del Conocimiento Científico*, A-Z Editora, Buenos Aires.

Kuhn, Thomas S. (1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago (1ª Ed. 1962). Versión castellana: *La Estructura de las Revoluciones Científicas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1977.

Matthews, Michael R. (1987), "Galileo's Pendulum and the Objects of Science", en B. and D. Arnstine eds., *Philosophy of Education*, Philosophy of Education Society, U.S.A., pp.309-319.

Matthews, Michael R. (1994), *Science Teaching. The Role of History and Philosophy of Science*, Routledge, New York.

Popper, Karl R. (1934), *The Logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London. Versión castellana: *La Lógica de la Investigación Científica*, REI, Buenos Aires, 1989.

Young, Hugh D. (1964), *Fundamentals of Mechanics and Heat*, Mc. Graw-Hill, New York.

Versión castellana: *Fundamentos de Mecánica y Calor*, Mc. Graw-Hill, Nueva York, 1966.