



PENSAMIENTO “BASADO EN MODELOS” EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS
NATURALES

‘MODEL-BASED’ THINKING IN SCIENCE TEACHING

Dr. Agustín Adúriz-Bravo¹

Fecha de recepción: 11-06-2015

Fecha de aceptación y versión final: 15-08-2015

Resumen: En este trabajo recorro, desde la perspectiva de la didáctica de las ciencias, algunos análisis que se han hecho de los diversos “modos” de pensamiento científico. Me detengo en una revisión del uso de lo que se ha llamado “racionalidad lógica” y “racionalidad narrativa” en la educación en ciencias naturales en los diferentes niveles, desde el inicial hasta el superior, bajo la hipótesis de que estos dos modos de pensamiento se pueden reconocer en los diversos textos científicos que se usan en la enseñanza. Relaciono el primer modo de pensamiento con la estructura “sintáctica” de las disciplinas científicas, validada dentro del famoso “contexto de justificación”, y el segundo modo con la construcción histórica de las disciplinas, que tiene lugar en el “contexto de descubrimiento”. Reconozco, en las clases y en los libros de texto de ciencias, un tercer modo de pensamiento “híbrido”, que puede llegar a ser fructífero a la luz de los actuales imperativos de la enseñanza de las ciencias para todos y todas. Postulo que este nuevo modo se apoya en el uso del razonamiento abductivo, que es “generador” de hipótesis y emplea fuertemente modelos teóricos. Concentrándome en la forma en que se usan los modelos y las pruebas o evidencias, hago una analogía entre el pensamiento científico y el pensamiento detectivesco; en ambos, las evidencias tendrían un lugar central para la proyección del modelo sobre el problema a resolver.

Palabras clave: Racionalidad, modos de pensamiento, modelos, evidencias, razonamiento abductivo, pensamiento científico, pensamiento detectivesco.

Summary: In this paper I go through a variety of analyses that have been performed on the different ‘modes’ of scientific thinking; I do this from the perspective of didactics of science (i.e., science education as an academic discipline). I mainly revise the use of what has been called ‘logical rationality’ and ‘narrative rationality’ in science education in the different educational levels, from Kindergarten to University, under the hypothesis that these two modes of thinking can be recognised in the diversity of scientific texts that are used when teaching science. I relate the first mode of thinking to the ‘syntactic’ structure of the scientific disciplines, validated within the famous ‘context of justification’, and the second mode to the historical development of the disciplines, which occurs in the ‘context of discovery’. I recognise, in science classes and textbooks, a third, ‘hybrid’ mode of thinking, which can prove fruitful under the light of the current imperatives of science education for all. I propose that this new mode is based on the use of abductive reasoning, which ‘generates’ hypotheses and strongly employs theoretical models. Focussing on the ways in which models and evidence are used, I analogue scientific thinking to detective thinking; in both, evidence plays a central role when projecting the model to the problem to be solved.

Keywords: Rationality, modes of thinking, models, evidence, abductive reasoning, scientific thinking, detective thinking

¹ Investigador Independiente del CONICET. Actualmente se desempeña como Docente-Investigador en la Universidad de Buenos Aires y en la Universidad Nacional de Tierra del Fuego. Es Profesor Visitante con continuidad en una decena de Universidades de Europa (España, Grecia) y América (Argentina, Colombia y Chile). Correo electrónico: aadurizbravo@cefiec.fcen.uba.ar

1. Introducción

En este trabajo me interesa explorar las posibilidades que brindan la caracterización teórica y la implementación práctica de diferentes "modos" de pensamiento científico dentro de la enseñanza de las ciencias naturales (física, química, biología, etc.) para los distintos niveles educativos, con mayor énfasis en la escuela secundaria obligatoria y postobligatoria (que atiende a estudiantes de 12 a 18 años). Mi objetivo es hacer foco en los "formas de pensar" que los científicos y científicas ponen en juego durante la producción (clásicamente, el "descubrimiento") y la validación (o "justificación") de sus ideas, enfatizando el "parecido de familia" de esas formas de pensar con otras que pueden tener un alto valor educativo. Me concentro sobre todo en lo que voy a llamar "pensamiento basado en modelos", cuyo estudio me permite asignar un rol específico a los modelos científicos (o "modelos teóricos", tal como se los concibe desde el semanticismo) en la enseñanza de las ciencias para que el estudiantado llegue a entender algunos aspectos centrales del funcionamiento de la actividad científica. Encuentro fundamental incorporar estas reflexiones en la formación del profesorado de ciencias naturales para contribuir a su profesionalización.

Todo los objetivos anteriores quedarían enmarcados en un propósito más general de investigación e innovación: el de encontrar, en la epistemología reciente y actual, "pistas" para una educación científica de calidad para todos y todas. Así, acuerdo con muchos autores que consideran que una "nueva" enseñanza de las ciencias tiene que estar *epistemológicamente fundamentada* (cf., Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003).

Voy a entender por "modo de pensamiento" el conjunto de inferencias y argumentaciones científicas, construidas individual o colectivamente y situadas históricamente en una época y en un lugar determinado. En este sentido, mi forma de comprender el constructo lo acercaría a las "maneras de averiguar" ("ways of finding out") de las que habla el epistemólogo canadiense Ian Hacking (2002).

Siguiendo de cerca una propuesta de Mercè Izquierdo-Aymerich (2014), parto de la hipótesis de que es posible reconocer dos modos de pensamiento (ella los llama "racionalidades") principales en las clases de ciencias naturales y en los materiales didácticos utilizados en dichas clases. Esos dos modos de pensamiento son el "lógico" y el "narrativo". Con base en esa constatación inicial, procedo a matizar la distinción lógica/narrativa proponiendo un tercer modo de pensamiento que puede ser fructífero en las aulas de ciencias por su contribución a la enseñanza de la llamada naturaleza de la ciencia.

La expresión "naturaleza de la ciencia" (NOS, por las siglas del inglés "nature of science") remite al actual consenso acerca de la necesidad de presentar explícitamente ideas acerca de *qué es la ciencia* en el espacio curricular de las ciencias naturales (cf., Vázquez Alonso y Manassero Mas, 2015); en el conjunto de esas ideas, la caracterización del raciocinio científico, y de sus semejanzas y diferencias con otras formas de pensar, me parece central (cf., Adúriz-Bravo, 2005).

2. Los modos de pensamiento científico en la historia de la ciencia

Mi interés por los modos de pensamiento me permite recoger antecedentes de una tradición importante dentro de la epistemología (o filosofía de la ciencia) en interfaz con la historia de la ciencia, tradición que ha buscado identificar "patrones" en el quehacer intelectual de los científicos de todos los tiempos. Es decir, mi trabajo se sitúa en una línea que apunta a la elucidación de lo que Winther (2012) llama

“categorías analíticas de las culturas científicas”. Entre tales categorías se incluirían, para el nivel de análisis macrohistórico, la noción de *paradigma* de Thomas Kuhn, las *epistemes* tal cual las entiende Michel Foucault o los *estilos de pensamiento científico* definidos por Alistair Crombie, para el nivel mesohistórico, los *estilos de pensamiento* (“Denkstile”) de Ludwik Fleck o los *programas de investigación científica* à la Lakatos, y para el nivel microhistórico, los estudios de dinámica del *cambio conceptual* científico de Nancy Nersessian.

Encuentro particularmente relevante para encuadrar mi trabajo la propuesta de “estilos de razonamiento científico” de Ian Hacking (2002), que él hace expandiendo y reinterpretando diversos textos de Crombie (cf., Crombie, 1994, volumen I, capítulo 2), en los que el historiador de la ciencia australiano postula un sistema de categorías que es ya clásico. Presento aquí mi propia relectura de esa propuesta, en la que incluyo siete estilos (véase Bueno, 2012, para una presentación complementaria):

1. el *axiomático*, que procede por postulación de principios y derivación deductiva de consecuencias, poniendo fuerte énfasis en las propiedades formales –coherencia, consistencia– del sistema completo de ideas;
2. el *experimental*, que replica, observa y mide, y puede servir para explorar –a escalas controladas– los rangos de validez de las postulaciones;
3. el *analógico*, que consiste en la hipotetización de modelos análogos de los que se afirma que mantienen relaciones de estrecho parecido estructural o funcional con el fenómeno “blanco” bajo estudio;
4. el *taxonómico*, que ordena la diversidad por comparación y diseña estructuras complejas de nomenclatura y clasificación;
5. el *probabilístico*, que realiza análisis calculando estadísticamente regularidades en “poblaciones”, en el sentido más amplio del término;
6. el *genealógico*, que fabrica “raccontos” históricos del desarrollo de sistemas de distinta complejidad y reconoce “filiaciones” o secuencias de causas y efectos; y
7. el *laboratoril*, que se caracteriza por la construcción de artefactos para aislar y recortar fenómenos existentes y crear nuevos, usualmente a gran escala.

Los estilos de razonamiento, tal cual los entiende Hacking, son abarcativos y transversales; no están comprometidos con ningún cuerpo teórico particular. Hacking busca así aminorar el énfasis puesto por la epistemología clásica en las teorías, para “[insistir] en la significación de una clase completa de actividades, que ejemplifican variadamente distintas formas de intervención” (Bueno, 2012: 658; la traducción es mía).

Al marco teórico de Hacking subyace una “periodización” –heredada de Crombie– que queda formada por la sucesión de estilos *dominantes* en cada época histórica de la ciencia; así, el estilo que procede por postulación dominó la Grecia clásica, el estilo experimental se estabilizó en el Renacimiento, el analógico cobró auge en el seno del programa newtoniano, y así sucesivamente. Sin embargo, conviene recordar que

cada estilo se ha hecho independiente de su historia [...], se ha transformado en lo que creemos ser cierto canon de objetividad, un estándar o modelo de lo que debe ser razonable acerca de este o ese tipo de conocimiento. (Hacking, 2002: 188; la traducción es mía)

Lo que Hacking denomina “estilo” en su propuesta original (formulada en la década del '80 y refinada en su texto canónico de 1992 [Hacking, 2002]) se va acercando progresivamente a lo que yo llamo “modo”, que es una nomenclatura que él también usa:

En estos momentos [...] “métodos de argumentación” o “modos de indagación” me van bien. El [nombre] que más me gusta es “maneras de averiguar” porque [mi] proyecto es *una* aproximación a la cuestión de cómo hemos averiguado las maneras de averiguar en lo que hoy en día llamamos las ciencias. (Hacking, 2012: s/p; cursivas en el original, la traducción es mía)

Entre los modos de indagar o averiguar sobre los que trabaja Hacking se entrevén diferencias implícitas en al menos tres cuestiones estructurales de gran centralidad: los métodos de justificación (argumentos), los métodos de raciocinio (inferencias) y los métodos de representación teórica del mundo; en mi opinión, para caracterizar esas diferencias es necesario recurrir a la noción de *modelo científico*, sobre todo desde sus formulaciones “modeloteóricas” del último cuarto del siglo XX. Mi estudio de los modos de pensamiento quiere detenerse explícitamente en todos los elementos anteriores, entendiéndolos desde corrientes epistemológicas recientes y actuales (nueva filosofía de la ciencia, post-kuhnianismo, concepción semántica de las teorías científicas). Me apoyo también en contribuciones teóricas de Howard Gardner (1983), Walter Fisher (1984), Jerome Bruner (1986, 1991, 2002) y Mercè Izquierdo-Aymerich (2014), “visitadas” desde la didáctica de las ciencias. Mi fin último es trasladar una conceptualización educacionalmente robusta de los modos de pensamiento a la construcción de unidades didácticas para la enseñanza de las ciencias y en especial *para la formación del profesorado de ciencias*.

De acuerdo con Bruner, la forma principal que tenemos los seres humanos de organizar tanto nuestra experiencia como nuestra memoria de los acontecimientos es la *narrativa* (esto es, contar cuentos o historias). La narrativa “es una forma convencional, culturalmente transmitida y constreñida por el nivel de maestría de cada individuo (...)” (Bruner, 1991: 4; la traducción es mía) cuya estructura semántica se diferencia fuertemente de la de las construcciones generadas mediante procedimientos *lógicos* e identificadas tradicionalmente con el pensamiento científico desde una mirada positivista. Sobre las construcciones lógicas “duras” es posible aplicar las nociones aléticas clásicas de verdad y falsedad, mientras que de las narrativas solo cabe predicar “verosimilitud”:

Las narrativas, entonces, son una versión de la realidad cuya aceptabilidad está gobernada por la convención y la “necesidad narrativa” más que por la verificación empírica y los requerimientos lógicos [...]. (Bruner, 1991: 4; la traducción es mía)

Con base en las distinciones brunerianas, defino el modo de pensamiento lógico como aquel asociado a la estabilización de la estructura *sintáctica* de las disciplinas científicas en su “forma final”: es decir, con la validación de un conjunto de proposiciones “bien trabadas” entre sí. Así, relaciono este modo de pensamiento con una concatenación del conocimiento bajo la forma de enunciados “nomotéticos” (i.e., guiados por leyes) altamente formalizados. El modo lógico hace énfasis en los aspectos inferenciales, lingüísticos y simbólicos más “duros”; por ello lo sitúo dentro del clásico “contexto de justificación” de las teorías científicas. Este modo se termina imponiendo en las disciplinas tradicionalmente llamadas “deductivas” –tales como la mecánica y la astronomía clásicas–, que pretendían apoyarse en explicaciones por “cobertura legal”.

Por su parte, defino el modo de pensamiento narrativo como aquel vinculado al devenir histórico de las disciplinas científicas y a sus procesos de construcción colectiva mediante raciocinio, justificación, debate y persuasión. Lo relaciono con la puesta en valor de los aspectos "argumentativos" de la ciencia, que se encuadrarían en el "contexto de descubrimiento". El modo narrativo sería así más característico de la retórica de las disciplinas que en el siglo XIX se reconocieron a sí mismas como "inductivas" (la geología o la biología evolutiva serían ejemplos "paradigmáticos"), en las cuales había una marcada preferencia por las explicaciones de carácter *teleonómico*, *funcional* o *genético*. Tales modos de explicar son puestos bajo sospecha por la epistemología ortodoxa, y habrá que esperar hasta los desarrollos de la llamada "nueva filosofía de la ciencia" en los años '50 para que se comprenda su funcionamiento y se acepte su legitimidad en la actividad científica.

3. Los modos de pensamiento en los textos y en las clases de ciencias

Mercè Izquierdo-Aymerich, apoyándose en sus análisis de las retóricas presentes en los libros de texto de ciencias (cf., Izquierdo-Aymerich, 2005), reconoce que los dos modos de pensamiento (o racionalidades) principales que ella describe —el lógico y el narrativo— son ampliamente utilizados en la "ciencia escolar". Así, la explicación del arcoíris sería un ejemplo paradigmático del modo de pensamiento lógico: típicamente, se parte por enunciar la ley de Snell, se postulan propiedades para las gotas de lluvia y los rayos de luz solar, y luego se hacen consideraciones geométricas para dar cuenta de la forma del arco y de la distribución de colores.

Por su parte, la racionalidad narrativa tendría su ejemplo prototípico en el relato del "descubrimiento" de la radiactividad por Henri Becquerel, quien, a causa de lo que se suele calificar de "accidente afortunado", llega a darse cuenta de que las sales de uranio velan placas fotográficas aun en ausencia de luz solar:

Luego de que una muestra de un compuesto de uranio estuvo brevemente expuesta a la luz solar, su experimento se vio interrumpido por varios días nublados, por lo cual Becquerel puso la placa fotográfica cubierta y el compuesto en un cajón. Más tarde, cuando concluyó el experimento y reveló la placa fotográfica, cuál no sería su sorpresa al encontrar que mostraba imágenes de la muestra de uranio. Nuevos experimentos demostraron que esta radiación nada tenía que ver con la fluorescencia, sino que era propiedad característica del elemento uranio.

El descubrimiento de Becquerel atrajo la atención de muchos científicos, que también comenzaron a estudiar este nuevo tipo de radiación. Uno de los colegas de Becquerel, Marie Curie, estudió este fenómeno y lo llamó *radiactividad*. (Burns, 1996: 118; cursivas en el original)

Izquierdo-Aymerich señala que en la educación científica formal se tiende a sobrevalorar el modo lógico, lo que usualmente produce en el estudiantado problemas serios de comprensión que, para su tratamiento eficaz, demandarían una integración más extensiva del modo narrativo:

La formación académica "deductiva" intenta utilizar una racionalidad lógica en la enseñanza, la racionalidad lógica de las teorías ya formalizadas; el problema es que, aún en el caso de que los alumnos estén dispuestos a incorporar [los] axiomas (...), conectan con dificultad con los fenómenos y la historia [de la

ciencia] nos muestra por qué. La actividad humana “competente” requiere también “racionalidad narrativa”: [l]a emergencia de conocimiento se produce en contextos específicos en los cuales la actividad es genuina. La historia de las ciencias ofrece posibilidades de identificarlos. (Izquierdo-Aymerich, 2014: 14-15)

Me resulta muy sugerente que, a fin de hacer entendibles la naturaleza y dinámica de las racionalidades tal cual ella las define, Izquierdo-Aymerich las homologa a dos épocas bien distinguibles de la novela policiaca. Según ella, el modo de pensamiento lógico correspondería al período “temprano” (desde fines del siglo XIX hasta la Primera Guerra Mundial), del cual Arthur Conan Doyle, con su personaje de Sherlock Holmes, sería un exponente destacado; por su parte, el modo de pensamiento narrativo se encontraría en la novela policiaca contemporánea, con autores tales como el sueco Henning Mankell o el italiano Andrea Camilleri.

La anterior analogía entre el pensamiento científico y el detectivesco es un heurístico muy conocido, pero que generalmente ha sido utilizado con baja potencia. En efecto, en la enseñanza de las ciencias es usual mencionar elementos clave comunes a la tarea de científicos y detectives, como son el inicio a partir de un *problema* o la recogida de *pruebas*; sin embargo, luego se ponen en valor solo parecidos superficiales entre ambas actividades, tales como la observación minuciosa y sistemática que es necesario llevar adelante. Un muy citado fragmento del lógico Irving Copi ilustra la aproximación más común al símil:

Toda investigación seria comienza con algún hecho o grupo de hechos cuyo carácter problemático atrae la atención del detective o del científico y con los cuales se inicia todo el proceso de la búsqueda. Habitualmente los datos iniciales que constituyen el problema son demasiado escasos para sugerir por sí mismos una explicación totalmente satisfactoria, pero pueden insinuar –al investigador competente– alguna hipótesis preliminar que lo conduzca a la búsqueda de hechos adicionales. Se espera que estos hechos adicionales sean pistas importantes para la solución final. El investigador inexperto o chapucero ignora todos, excepto los más obvios de ellos; en cambio, el trabajador cuidadoso tratará de ser completo en su examen de los hechos adicionales a los que lo ha conducido su hipótesis preliminar. (Copi, 1984: 194)

En mi opinión, esta analogía puede aprovecharse mucho más a fondo si se comparan las inferencias que se hacen en ambos casos, es decir, si se estudian más cuidadosamente los modos de pensamiento subyacentes. Para mis análisis me valgo del constructo de prueba (“evidencia”) y modelizo los “modos de averiguar” no solo deductivamente sino también con razonamientos *ampliativos* (es decir, no demostrativos), que serían “paralógicos” respecto de la lógica clásica, en la que se identificaban como falaces. Como indiqué más arriba, me nutro principalmente de marcos referenciales epistemológicos de la segunda mitad del siglo XX (Norwood R. Hanson, Peter Achinstein, Paul Thagard, Peter Lipton, Juan Samaja, Sami Paavola, Dimitris Psillos, Ron Giere, etc.) que se abren a las “nuevas lógicas” y se enfocan en el estudio de las inferencias ampliativas¹.

Encuentro así que el pensamiento científico y el detectivesco son, en muchos casos, “generadores” de hipótesis, “arrastrados” por problemas (“problem-driven”), “apoyados” en evidencias (“evidence-based”) y fuertemente *basados en modelos teóricos* (entendidos como en Giere, 2009). Estas similitudes quedan capturadas en muchos de los verbos que se usan para describir ambas actividades: *investigar* (buscar “vestigios” o huellas), *indagar* (conectado con “perseguir” y “dar caza”), *inquirir* y *pesquisar* (relacionados con “querer”, en el sentido de “preguntar”) e incluso

"recercar" ("volver a rodear/buscar") que no existe en castellano pero sí en casi todas las lenguas romances.

El análisis previo me lleva a postular la existencia, en las clases y en los materiales didácticos, de un tercer modo de pensamiento, "híbrido", que "suelta" rasgos centrales de los otros dos. Lo voy a llamar "modo de pensamiento evidencial". Este modo se podría ejemplificar muy bien mediante las presentaciones didácticas "canónicas" de la idea de composición galileana del movimiento:

Si queremos cruzar transversalmente un río a nado, ¿qué hemos de hacer? Nadar en una dirección ligeramente oblicua contra la corriente para que, por composición de movimientos, alcancemos el punto deseado. (Aguilar y Senent, 2002: 22)

Considero que el breve párrafo anterior no se encuadra completamente ni en la racionalidad lógica (ya que no parte de primeros principios y desde allí realiza deducciones) ni en la racionalidad narrativa (ya que no cuenta una secuencia "bien hilada" de acontecimientos). Más bien aquí se postula un problema y se deja entrever una solución plausible. Así, se podría hablar de un tercer modo valioso en las clases de ciencias naturales, que quedaría definido por su objetivo de hacer ver como plausible una explicación para un determinado *estado de cosas* que se asume como problemático y a partir de una determinada *base de conocimiento* que se tiene por aceptada. Estas dos características *pragmáticas* acercarían el pensamiento científico no solo al pensamiento detectivesco o policiaco, sino también al médico y al forense.

Retomando la analogía de Izquierdo-Aymerich, Identifico el modo de pensamiento evidencial con la "época dorada" de la novela policiaca, cuyo "epítome" sería Agatha Christie. Este modo requeriría echar a mano a razonamientos no demostrativos (es decir, más allá de la deducción), pero que tampoco se encuadrarían completamente en patrones inductivos (de trasvase o de generalización de "toques" o "caracteres"). En este sentido, acuerdo con Rodolfo Gaeta cuando, siguiendo de cerca al epistemólogo griego Dimitris Psillos, nos advierte que "ni la lógica deductiva ni la inductiva resultan adecuadas para dar cuenta de los razonamiento ampliativos que se usan de hecho tanto en la investigación científica como en las actividades humanas corrientes" (Gaeta, 2008: 395).

Las características que fui enunciando en los párrafos anteriores me llevan a modelizar el modo de pensamiento evidencial con razonamientos *abductivos*. La abducción se puede entender, en su sentido más amplio, como una clase de inferencias que producen hipótesis de trabajo fructíferas (por eso se la llama, especialmente en el ámbito anglosajón, "inferencia a la mejor explicación"). Las hipótesis que se formulan "proviene de la elección de *reglas* adecuadas que se basan en [el] conocimiento del mundo" (Panizza, 2005: 47; cursivas en el original). Esas "reglas", tal cual lo sugería Charles S. Peirce, son usualmente propiedades del tipo "p → q".

Mi identificación del modo de pensamiento evidencial con el uso consistente de patrones abductivos me lleva a poner en valor los modelos científicos, que serían las fuentes de las reglas à la Peirce. En mi opinión, en el trabajo científico y en el detectivesco, un modelo, que puede ser formulado ad-hoc o más frecuentemente seleccionado del cuerpo de conocimiento preestablecido, funcionaría como "mapa" abstracto de la situación para activar razonamientos del estilo de "Si tengo razón en que esto (el *fenómeno* problemático) es un caso de aquello (el *modelo* bajo el cual se abduce), entonces debería pasar esto, lo otro y lo de más allá". Tales razonamientos

permiten generar predicciones contrastables por medio de intervenciones bien diseñadas, y así evaluar críticamente la pertinencia de la suposición o conjetura inicial ("esto es un caso de aquello").

4. Diseño de materiales para una enseñanza de las ciencias basada en modelos

En esta última sección quiero discutir qué lugar cabría dar al modo de pensamiento evidencial y al uso de modelos teóricos en la producción de materiales didácticos dirigidos a la formación inicial y continuada del profesorado de ciencias, sobre todo en lo que hace a la emergente componente curricular de la naturaleza de la ciencia. Haré algunas consideraciones sobre esta cuestión utilizando para ello como contexto de discusión el episodio histórico de la postulación del modelo del "átomo planetario" por Ernest Rutherford.

Las presentaciones usuales de este modelo en los libros de texto hacen hincapié en un conjunto de aspectos altamente "estereotipados", como los siguientes:

1. El núcleo atómico se "descubre": está allí, y Rutherford lo encuentra.
2. Los experimentos de Geiger y Marsden llevan directamente al descubrimiento: ponen en evidencia la existencia indubitable del núcleo.
3. Los resultados de tales experimentos son inesperados para el "establishment" científico de la época y contradicen flagrantemente el modelo de Thomson.
4. El proceso completo ocurre porque se "demuestra" que las dispersiones de ángulo grande se deben a un pequeño núcleo cargado positivamente y situado en el centro del átomo, y por tanto se "deduce" que la mayor parte del átomo es espacio vacío.
5. Aunque se habla del "modelo de Rutherford", la categoría epistemológica de modelo en este episodio queda restringida, con muy poco vuelo, a una representación visual que pretende desvelar "cómo son realmente" las cosas una vez descubiertas.

En este ejemplo escolar, como en muchos otros, asistimos a una superposición del modo de pensamiento lógico, con una reconstrucción abusiva de las inferencias del registro histórico para que aparezcan como pseudo-deductivas².

El trabajo con fuentes históricas primarias y secundarias nos lleva a derrumbar rápidamente estas cinco "certezas" y poder trabajar más fructíferamente con este ejemplo en la formación docente, introduciendo en su tratamiento el modo de pensamiento evidencial y asignando un rol específico al modelo teórico.

En primer lugar, los experimentos de Geiger y Marsden no eran los únicos intentos de investigar la estructura de la materia con la técnica de "inspección por bombardeo", es decir, a través de la dispersión de partículas alfa (¡y beta!). Por lo menos desde 1908, James A. Crowther, colega de J.J. Thomson, realiza intervenciones similares, y el propio Thomson utiliza su modelo del "budín de ciruelas" para explicar satisfactoriamente los resultados. Todo ello no es desconocido por Rutherford:

Se ha supuesto generalmente que la dispersión de un haz ["pencil"] de rayos α o β pasando a través de una placa delgada de material es el resultado de una multitud de pequeñas dispersiones en los átomos de la materia atravesada. (Rutherford, 1911: 669; la traducción es mía)

Pero entonces, si los resultados eran bien conocidos en la época y no derrumbaban el modelo vigente, ¿cómo podemos explicar la transición hacia un "átomo con núcleo"? En mi opinión, son *tanto* la puesta en duda de la base de conocimiento de la época utilizado en la modelización de la dispersión a la Thomson (la dispersión compuesta, debida a múltiples rebotes) *como* el intento de ajustar mejor los juegos de datos que se iban obteniendo al refinarse progresivamente los experimentos (probabilidades de dispersión para cada ángulo) los que llevan a Rutherford a abducir (*suponer*) la idea de la existencia de una "divergencia" de la carga eléctrica en alguna zona del átomo:

La teoría de Sir J.J. Thomson [...] no admite una deflexión grande de la partícula alfa atravesando un único átomo, *a menos que se suponga que el diámetro de la esfera de electricidad positiva es diminuta comparada con el diámetro de influencia del átomo.* (Rutherford, 1911: 670; el subrayado y la traducción son míos)

Si tomamos una carta de Rutherford a William H. Bragg, del 9 de febrero de 1911, en la que él acusa a Crowther de usar demasiada imaginación y de ser incapaz de darse cuenta dónde la teoría estándar es inaplicable, no es descabellado suponer que aquel está "preparando el terreno" para poder afirmar que su osada propuesta de un modelo teórico alternativo constituye lo que podríamos considerar la "mejor explicación":

He inspeccionado el artículo de Crowther sobre dispersión con cuidado, y cuanto más lo examino más me maravillo de la manera en que él hizo que se ajustara [...] a la teoría de J.J. [Thomson]. De hecho, *creo que yo puedo explicar la primera parte de su curva de dispersión [...].* (Eve, 2013 [1939]: 195; la traducción y las cursivas son mías)

A su vez, un testimonio muy posterior de Hans Geiger, recordando su trabajo con Rutherford en el invierno de 1910 a 1911, nos permite ver cómo la postulación del modelo se vuelve sobre los experimentos, requiriendo refinarlos a la luz de la nueva idea para encontrar mejores ajustes:

Un día Rutherford [...] vino a mi despacho y me dijo que ahora *sabía* cómo era el átomo ["what the atom looked like"] y cómo explicar las deflexiones grandes de partículas- α . Ese mismo día comencé un experimento para poner a prueba la relación *esperada* por Rutherford entre el número de partículas dispersadas y el ángulo de dispersión. (Eve, 2013 [1939]: 198; la traducción y las cursivas son mías)

De acuerdo con la lectura que hago de estos fragmentos, estamos ante uno de esos ciclos de aplicación de inferencias del tipo "Si tengo razón en esto, entonces debería ser el caso que esto otro". Tales ciclos son análogos a los que Peirce, en sus escritos tempranos, llama "hipótesis" (entendida como proceso, no como producto), en los cuales "encontramos una circunstancia muy curiosa que se explicaría por la suposición de que es un caso de una cierta regla general, y por tanto adoptamos tal suposición" (Peirce, 1992 [1878]: 189; la traducción es mía). En el ciclo que estamos examinando, el modelo teórico ("carga desigualmente distribuida en el camino de las partículas incidentes") permite explicar y predecir (probablemente de forma más económica y precisa que con el modelo rival) y sugiere cursos de acción fructíferos.

Cabe recordar también que la propuesta original de Rutherford contenida en su célebre artículo de 1911 se nos presenta, desde la retórica, con un fuerte carácter *hipotético*; por ejemplo, él no usa aún la palabra "núcleo" y todavía oscila entre interpretar el centro de carga como positivo o negativo (cf. Dahl, 1997).

Por último, y tal cual lo relata Mansoor Niaz (2009) con mucho detalle, la postulación del modelo planetario no "tira abajo" el modelo del pudín: ambos coexisten en un interregno de controversia al interior de la comunidad científica. En este período de varios años se podría decir que aún no "existe" (en el sentido realista fuerte) el núcleo atómico, dado que los científicos dudan de la "necesidad" de la idea para explicar las observaciones disponibles.

Con estas breves notas podemos volver ahora a los cinco "hitos" de más arriba, repetidos acríticamente en muchos libros de texto, y hacer una reconstrucción muy diferente y con mayor valor didáctico (ver también Niaz, 2009):

1. El núcleo atómico se "inventa" en un intento de proveer una "mejor explicación" (más parsimoniosa, precisa, elegante, fructífera, etc.) para la acumulación de resultados de experimentos de dispersión. La nueva explicación está apoyada en un modelo alternativo de la localización de las cargas eléctricas al interior del átomo.

2. Hay una gran cantidad y variedad de esos experimentos, que van aportando datos que servirán como "evidencia" a distintos modelos atómicos. La relación entre esa evidencia y cada modelo es compleja: se van apoyando y constriñendo mutuamente.

3. El modelo de Thomson (como todo modelo científico) ajusta *en ciertos grados y aspectos* los resultados experimentales, por lo menos hasta tanto no se rediseñan los montajes con la intención de "poner de relieve" la hipótesis de Rutherford.

4. El análisis matemático de la dispersión no "demuestra" la presencia de un núcleo: esta relación no puede ser jamás deductiva (por la llamada "infradeterminación de la teoría por la evidencia empírica"). La relación es más bien abductiva: se propone la idea del núcleo para dar cuenta de los hechos y luego esa idea va imponiéndose a sus rivales merced a su valor epistémico y a factores de contexto.

5. Lo que podemos considerar "modelo" en el pensamiento de Rutherford es anterior a la imagen arquetípica del átomo con núcleo y anillos. El modelo que se usa aquí combina dos premisas fuertes: que la carga al interior del átomo está distribuida inhomogéneamente y que la dispersión de cada partícula alfa se produce por un único "choque".

Así, el episodio de histórico del átomo de Rutherford, reconstruido con mi modo de pensamiento evidencial, muestra que los datos de los experimentos no llevan sin ambigüedades a la formulación de teorías, y que datos experimentales similares pueden ser interpretados de varias maneras diferentes. (Niaz, 2009: 86; la traducción es mía)

Además, asigna al modelo teórico detentado por cada científico participante del episodio una función estructuradora de los razonamientos y argumentos. Esto constituye una idea potente de naturaleza de la ciencia, que pone de relieve la importancia de los modelos en el pensamiento científico. Creo que esta idea debería formar parte del conocimiento profesional del profesorado de ciencias, dado que permite acercar la "ciencia erudita" y la "ciencia escolar" en aspectos que son sustantivos (la racionalidad) y que resultan formativos para los estudiantes.

Bibliografía

Adúriz-Bravo, A. (2005) *Una introducción a la naturaleza de la ciencia: La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.

- Aguilar, J. y Senent, F. (2002) *Cuestiones de física*. Barcelona: Reverté. (Primera edición de 1986.)
- Bruner, J.S. (1986) *Actual minds, possible worlds*. Cambridge: Harvard University Press.
- Bruner, J.S. (1991) "The narrative construction of reality". En *Critical Inquiry*, 18(1), 1-21.
- Bruner, J.S. (2002) *Making stories: Law, literature, life*. Nueva York: Farrar, Straus and Giroux.
- Bueno, O. (2012) "Styles of reasoning: A pluralist view". En *Studies in History and Philosophy of Science*, 43, 657-665.
- Burns, R.A. (1996) *Fundamentos de química*. 2ª edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana. (Original en inglés de 1995.)
- Copi, I. (1984) *Introducción a la lógica*. 27ª edición. Buenos Aires: EUDEBA. (Original en inglés de 1953.)
- Crombie, A.C. (1994) *Styles of scientific thinking in the European tradition: The history of argument and explanation especially in the mathematical and biomedical sciences and arts*. Londres: Duckworth.
- Dahl, P.F. (1997) *Flash of the cathode rays: A history of J.J. Thomson's electron*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Eve, A.S. (2013) *Rutherford: Being the life and letters of the Rt Hon. Lord Rutherford, O.M.* Cambridge: Cambridge University Press. (Edición original de 1939.)
- Fisher, W.R. (1984) "Narration as a human communication paradigm: The case of public moral argument". En *Communication Monographs*, 51, 1-18.
- Gaeta, R. (2008) Consideraciones acerca del argumento del no milagro, en R. de Andrade Martins, C. Celestino Silva, J. Mesquita Hidalgo Ferreira y Lilian Al-Chueyr Pereira Martins. *Filosofia e História da Ciência no Cone Sul: Seleção de Trabalhos do 5º Encontro*, 391-398. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC).
- Gardner, G. (1983). *Frames of mind: The theory of multiple intelligences*. Nueva York: Basic Books.
- Giere, R.N. (2009) Why scientific models should not be regarded as works of fiction, en M. Suárez. *Fictions in science: Philosophical essays on modeling and idealization*, 248-258. Londres: Routledge.
- Hacking, I. (2002) *Historical ontology*. Cambridge: Harvard University Press.
- Hacking, I. (2012) "Language, truth and reason: 30 years later: Abstract". <http://www.cilt.uct.ac.za/sites/default/files/image_tool/images/160/Conference%20abstracts.pdf> [Consulta: mayo 2016].
- Izquierdo-Aymerich, M. (2005) "Estructuras retóricas en los libros de ciencias". En *Tarbiya*, 36, 11-33.
- Izquierdo-Aymerich, M. (2014) Pasado y presente de la química: Su función didáctica, en C. Merino, M. Arellano y A. Adúriz-Bravo. *Avances en didáctica de la química: Modelos y lenguajes*, 12-36. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- Izquierdo-Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2003) "Epistemological foundations of school science". En *Science & Education*, 12(1), 27-43.
- Lawson, A.E. (2003) "The nature and development of hypothetico-predictive argumentation with implications for science teaching". En *International Journal of Science Education*, 25(11), 1387-1408.
- Lawson, A.E. (2010) "Basic inferences of scientific reasoning, argumentation, and discovery". En *Science Education*, 94(2), 336-364.
- Niaz, M. (2009) *Critical appraisal of physical science as a human enterprise: Dynamics of scientific progress*. Dordrecht: Springer.
- Panizza, M. (2005) *Razonar y conocer: Aportes a la comprensión de la racionalidad matemática de los alumnos*. Buenos Aires: Libros del Zorzal.

Peirce, C.S. (1992 [1878]) Deduction, induction and hypothesis, en N. Houser y C. Kloesel. *The essential Peirce: Selected philosophical writings, Volume 1 (1867–1893)*, 186-199. Bloomington: Indiana University Press.

Rutherford, E. (1911) "The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom". En *Philosophical Magazine, Serie 6, Volumen 21*, 669-688.

Vázquez Alonso, Á. y Manassero Mas, M.A. (2015) "Una taxonomía para facilitar la enseñanza explícita de la naturaleza de la ciencia y su integración en el desarrollo del currículo de ciencias". En *Interacções*, 34, 312-349.

Winther, R.G. (2012) "Interweaving categories: Styles, paradigms, and models". En *Studies in History and Philosophy of Science, Part A*, 43(4), 628-639.

Notas

¹Ya en el campo de la didáctica de las ciencias, encuentro sumamente relevantes las aportaciones que, sobre estas mismas cuestiones, hace Anton Lawson (2003, 2010).

²Mabel Panizza (2005), en un contexto muy diferente (el del raciocinio matemático en estudiantes), reconoce este mismo deslizamiento hacia modos que "se mimetizan" con el deductivo; ella lo atribuye a la diversidad de comprensiones que admitiría el "entonces" (→) en la regla peirciana.