

El conocimiento científico y el cotidiano: comparación e implicaciones para el aprendizaje

Frederick Reif y Jill H. Larkin



R

La ciencia que se enseña en la escuela suele ser muy distinta de la ciencia real. También de los conocimientos correspondientes empleados en la vida cotidiana. Partiendo de tan desalentadora situación, el autor propone alternativas prácticas para cambiarla, llevando a la conciencia del estudiante esas distintas características en los objetivos y medios cognitivos de cada una de estas «tres ciencias».

INTRODUCCION

Muchos estudiantes tienen grandes dificultades para aprender ciencias en segunda enseñanza o en niveles superiores. Algunas de estas dificultades se deben a las nociones ingenuas preexistentes que los estudiantes tienen del mundo físico. Por ejemplo, los estudiantes suelen creer que no puede darse movimiento sin la presencia de una fuerza o que un objeto se mueve en la dirección de la fuerza que actúa sobre él. Muchas de estas ideas preexistentes están bien documentadas (por ejemplo, Caramazza, McCloskey y Green, 1981; Clement, 1982; Cohen, Eylon y Ganiel, 1983; diSessa, 1982, 1983; Driver, Guesne y Tiberghien, 1985; Gunstone, 1987; Haloun y Hestenes, 1985a, 1985b; Helm y Novak, 1983; McCloskey, Caramazza y Green, 1980; McDermott, 1984; Trowbridge y McDermott, 1980, 1981; Viennot, 1979; White, 1983). Otras dificultades se deben a la necesidad que se tiene en ciencia de tratar con conceptos abstractos y de resolver problemas complejos (Chi, Felto-vich y Glaser, 1981; Chi, Glaser y Rees, 1981; Heller y Reif, 1984; Labudde, Reif y Quinn, 1988; Larkin, 1981; Larkin, McDermott, Simon y Simon, 1980; Reif, 1983, 1987a, 1987b).

Este artículo identifica una fuente potencialmente más profunda de las dificultades de los estudiantes, que tiene sus raíces en el hecho de que la ciencia está concebida deliberadamente para alcanzar objetivos especiales. Por tanto, es «artificial» en el sentido empleado por Simon (1981) y, en diversos aspectos, es sustancialmente diferente del conocimiento «natural» de la vida de cada día. Estas diferencias conducen a dificultades de aprendizaje importantes porque muchos estudiantes no comprenden adecuadamente los objetivos de la ciencia ni los tipos de procesos cognitivos necesarios para abordar este ámbito desconocido. De ahí que los estudiantes suelen aspirar a objetivos incorrectos y recurrir a medios cognitivos inadecuados.

Las personas familiarizadas con un ámbito de conocimientos determinado normalmente han aprendido a actuar adecuadamente en ese ámbito; comprenden sus objetivos y utilizan medios cognitivos bien adaptados a esos objetivos. Por ejemplo, la mayoría de las personas se enfrentan con éxito a las demandas cognitivas de la vida de cada día. De manera similar, los científicos experimentados se enfrentan con éxito a las demandas cognitivas del ámbito relativo al conocimiento científico.

Sin embargo, cabe esperar dificultades siempre que alguien trate de abordar un ámbito de conocimientos previamente desconocido. Nuestro interés se centrará, especialmente, en las dificultades generales de aprendizaje experimentadas por los estudiantes que tratan de aprender sobre el ámbito de conocimientos, para ellos desconocido, de la ciencia.

Las referencias antes citadas ofrecen evidencias impresionantes de la dificultad de modificar las nociones, los prejuicios y los malentendidos ingenuos que tienen los estudiantes acerca del mundo físico. Aún cabe esperar mayores dificultades cuando se intentan modificar las nociones que tienen los estudiantes de los objetivos de la ciencia y de los procesos cognitivos útiles en este ámbito. Ciertamente, el cambio necesario no solo implica nociones o malentendidos particulares sino también ideas generales sobre objetivos y maneras de pensar de la ciencia.

El objetivo de este artículo es comparar con detalle los ámbitos de conocimiento científico y cotidiano para poner de manifiesto las claras diferencias existentes entre sus objetivos y los procesos cognitivos empleados para alcanzarlos. Esta comparación nos llevará a discutir las siguientes cuestiones de importancia para la enseñanza:

- A causa del deficiente conocimiento sobre los objetivos y los requisitos de la ciencia, los estudiantes suelen aspirar a objetivos de aprendizaje inadecuados incluyendo a) transferir objetivos cotidianos a la ciencia cuando esos objetivos no son adecuados y b) abrigar malentendidos sobre los objetivos de la ciencia.
- A causa del deficiente conocimiento sobre los tipos de cognición útil en la ciencia, los estudiantes suelen utilizar medios cognitivos mal adaptados al método científico, incluyendo a) transferir métodos eficaces en la vida cotidiana al ámbito científico, donde son inadecuados y b) concebir métodos inadecuados al trabajo científico.
- La situación es aún más compleja porque la «ciencia escolar» (es decir, la ciencia tal como se enseña en las escuelas) difiere tanto de la ciencia real como de la vida de cada día, aunque comparte algunas características de ambas. Por tanto, tiene sus propios objetivos y sus correspondientes métodos cognitivos que difieren de los de la verdadera ciencia. Como resultado, las dificultades de aprendizaje de los estudiantes pueden tener una naturaleza compuesta porque los objetivos científicos reales están distorsionados y las maneras científicas de pensar se enseñan inadecuadamente.

Nuestros objetivos al presentar este análisis son destacar importantes cuestiones cognitivas que, con algunas excepciones (por ejemplo, Schoenfeld, 1983, 1987) rara vez han sido examinadas en el pasado; ofrecer un marco de referencia para estudiar estas cuestiones; mostrar evidencias de que estas cuestiones son importantes para la enseñanza de la ciencia; y sugerir investigaciones empíricas y enfoques pedagógicos para profundizar más en estas cuestiones.

TIPOS DE CONOCIMIENTO EN UN AMBITO

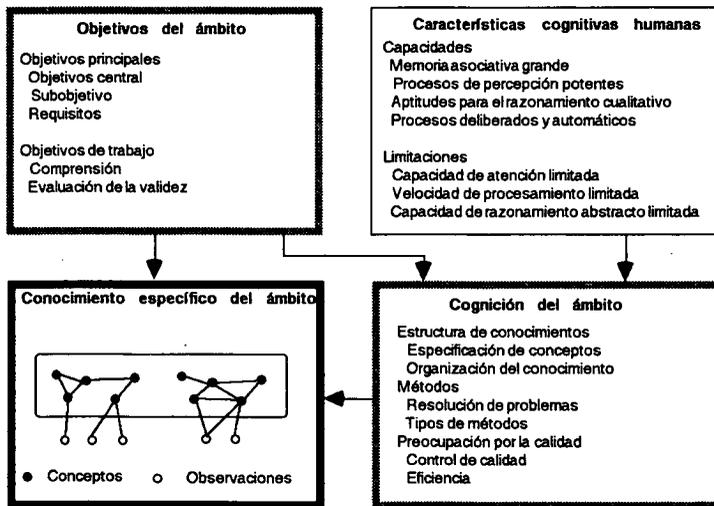
Un ámbito de conocimientos es la colección de conocimientos declarativos y procedimentales útiles para alcanzar algunas metas concretas (como ejemplos tenemos los ámbitos de conocimiento de la física o de la vida de cada día). En los párrafos que siguen se examinan los tipos de conocimiento importantes en cualquiera de estos ámbitos y se indica cómo las inadecuaciones de estos conocimientos pueden llevar a dificultades de aprendizaje cuando se aborda un ámbito previamente desconocido.

Conocimiento específico del ámbito. Evidentemente, el conocimiento específico de un ámbito es importante. Consta de los conceptos utilizados en ese ámbito, las relaciones entre ellos y los métodos para abordarlos. Por ejemplo, el conocimiento específico de la física consta de los conceptos, principios y métodos útiles en física. De manera similar, el conocimiento específicamente cotidiano consta de los conocimientos y métodos objetivos útiles para enfrentarse a la vida de cada día.

Como se indica en el rectángulo recuadrado en negro de la Figura 1, el conocimiento específico de un ámbito también incluye especificaciones sobre cómo se conectan los conceptos con las observaciones que, en última instancia, pretenden describir. (El ámbito de la matemática pura es excepcional ya que es totalmente conceptual y simbólico y, por tanto, no se refiere explícitamente a ninguna observación).

El conocimiento específico de un ámbito, especialmente fuera del ámbito de la ciencia, puede no ser enteramente consciente y, por tanto, no siempre expresable de manera explícita.

FIGURA 1
Aspectos importantes de un ámbito de conocimiento



Como se indica en la Figura 1, el conocimiento específico de un ámbito se basa en los objetivos del ámbito y en la cognición útil para ese ámbito. Esta cognición, que también recibe la influencia de los objetivos del ámbito, está aún más limitada por las características cognitivas generales humanas. En los párrafos siguientes se comentan estos aspectos del ámbito.

Objetivos del ámbito. Los objetivos de un ámbito influyen de manera crucial tanto en la naturaleza del conocimiento específico del ámbito como en la cognición útil para el mismo. (Por ejemplo, el objetivo fundamental de la ciencia es explicar y predecir fenómenos observables. En consecuencia, el conocimiento específico de la ciencia y la cognición científica están especialmente concebidos para alcanzar estos objetivos). El objetivo fundamental del ámbito impone unos requisitos correspondientes al conocimiento necesario para su consecución. (Por ejemplo, el objetivo de alcanzar un gran poder predictivo solo puede alcanzarse si el conocimiento es adecuadamente general y preciso). El objetivo fundamental también influye en los objetivos de trabajo normalmente establecidos en el ámbito como, por ejemplo, lograr la comprensión y evaluar la validez.

Características cognitivas humanas. Como las tareas intelectuales de un ámbito son llevadas a cabo principalmente por personas, las aptitudes y limitaciones cog-

tivas humanas restringen los tipos de procesos cognitivos utilizables en el ámbito. Las aptitudes y limitaciones de interés especial en nuestra discusión se detallan en la Figura 1 y serán examinados con mayor profundidad más adelante.

Cognición del ámbito. Los objetivos de un ámbito y las características de la cognición humana determinan conjuntamente los medios cognitivos particularmente útiles en este ámbito. Por ejemplo, para alcanzar los objetivos científicos predictivos y explicativos, los científicos, sujetos a las limitaciones de la cognición humana, han concebido formas especiales de conocimiento y métodos especiales para garantizar una ejecución eficaz, eficiente y sin errores. En palabras del biólogo molecular François Jacob (1988, p. 306): «El mundo de la ciencia, como el del arte o la religión, es un mundo creado por la imaginación humana pero dentro de límites estrictos impuestos por la naturaleza y por el cerebro humano».

Metaconocimiento. El conocimiento de los objetivos y la cognición útil en un ámbito (que se resume en los rectángulos recuadrados en gris de la Figura 1) se puede denominar «metaconocimiento» porque es un conocimiento de nivel superior acerca de un conocimiento específico del ámbito 1.

La posesión de este metaconocimiento puede influir marcadamente en el rendimiento de las personas en el ámbito. Por tanto, el metaconocimiento que tienen de los objetivos de un ámbito puede determinar de manera crucial que aspiren o no a objetivos adecuados y cumplan con los requisitos necesarios para alcanzarlos. De manera similar, su metaconocimiento de la cognición útil en este ámbito puede determinar de una manera crucial que utilicen o no estrategias cognitivas adecuadas en este ámbito. Por ejemplo, un trabajo competente en física no solo requiere conocimientos específicos de los principios y métodos de la física; también requiere un conocimiento general de los objetivos de la física y de las maneras de pensar útiles en este ámbito¹.

Por tanto, al tratar de abordar un ámbito de conocimiento previamente desconocido, no solo es necesario aprender el conocimiento específico del nuevo ámbito sino también el metaconocimiento necesario. Ciertamente, deficiencias en este metaconocimiento pueden llevar a unas dificultades de aprendizaje generales.

En los próximos dos apartados analizaremos y compararemos con mayor detalle los objetivos y la cognición de los ámbitos cotidiano y científico, y destacaremos algunas de las dificultades de aprendizaje resultantes. (Por conocimiento cotidiano entendemos el conocimiento común sobre fenómenos naturales adquirido por la mayoría de las personas en la vida diaria y en las primeras etapas de escolarización, antes de llegar a un estudio más sistemático de la ciencia. Por conocimiento científico entendemos principalmente el conocimiento abarcado por las ciencias físicas de la actualidad).

Nuestro análisis se centrará específicamente en los tipos de metaconocimiento indicados en los rectángulos recuadrados en gris de la Figura 1 y detallados en la columna izquierda de la Tabla I. Las otras columnas de la Tabla I ofrece una visión esquemática de este análisis indicando las principales características de este metaconocimiento en los ámbitos científico y cotidiano. El último apartado de este artículo se basará en este análisis comparativo para proponer algunas investigaciones empíricas y recomendaciones pedagógicas.

TABLA I
Comparación esquemática entre los ámbitos de conocimiento cotidiano y científico

	AMBITO COTIDIANO	AMBITO CIENTIFICO
Objetivos del ámbito		
<i>Objetivos principales</i>		
Objetivos central	Llevar una buena vida	Predicción y explicación óptimas
Subobjetivo	Predicción y explicación adecuadas	

TABLA I (continuación)
Comparación esquemática entre los ámbitos de conocimiento cotidiano y científico

	AMBITO COTIDIANO	AMBITO CIENTIFICO
Requisitos	Generalidad, frugalidad, precisión y coherencia adecuadas	Generalidad, frugalidad, precisión y coherencia máximas
Objetivos de trabajo		
Comprensión	Pocas inferencias Varias premisas aceptables	Muchas inferencias Premisas bien especificadas
Evaluar validez	Importancia moderada Varias premisas aceptables Reglas de inferencia plausibles	Importancia fundamental Premisas basadas en la observación Reglas de inferencia bien especificadas
Cognición del ámbito		
<i>Estructura de conocimiento</i>		
Especificación de conceptos	Implícita y basada en esquemas	Explícita y basada en reglas
Organización del conocimiento	Localmente coherente Organización asociativa	Globalmente coherente Organización lógica
Métodos		
Resolución de problemas	Inferencias breves basadas en una rica recopilación de conocimientos	Inferencias largas basadas en un conocimiento frugal
Tipos de métodos	Informal	Formal e informal complementarios
Preocupación por la calidad		
Control de calidad	Informal	Estricta y explícita
Eficacia	Naturaleza eficiente para tareas cotidianas	Diseñado para ser eficiente en tareas complejas

Objetivos de los ámbitos cotidiano y científico

En este apartado se examinan y comparan los distintos objetivos principales de la vida cotidiana y de la ciencia y los objetivos de trabajo necesarios para alcanzar la comprensión y evaluar la validez.

OBJETIVOS PRINCIPALES

Objetivos fundamentales y subobjetivos

Objetivos cotidianos implícitos. Los objetivos de la vida cotidiana son principalmente implícitos y no están definidos con claridad. A grandes rasgos, el objetivo central es vivir una vida satisfactoria. Para conseguir este objetivo es necesario abordar satisfactoriamente el propio entorno. Por tanto, es importante aspirar al subobjetivo de predecir, y en ocasiones explicar, fenómenos físicos y biológicos comúnmente observados. Por ejemplo, es útil predecir que un coche aparcado rodará cuesta abajo

si sus frenos fallan o explicar por qué pulsar un interruptor no produce la luz esperada en una lámpara.

Objetivos científicos explícitos. En el ámbito de la ciencia, este subobjetivo implícito de la vida cotidiana se eleva hasta convertirse en el objetivo fundamental explícito al que aspirar en la medida de lo posible. Por tanto, el objetivo fundamental de la ciencia es alcanzar una predicción y una explicación óptimas ideando conocimientos teóricos especiales que, de manera frugal (es decir, en base a un número mínimo de premisas), permitan realizar inferencias sobre el máximo número posible de fenómenos observables. En palabras de Einstein (1954, p. 293): «El objetivo de la ciencia es, por una parte, comprender de la manera más completa posible la conexión entre las experiencias sensoriales en su totalidad y, por otra, alcanzar este objetivo mediante el empleo de una cantidad mínima de conceptos y relaciones primarios».

Requisitos

Requisitos cotidianos limitados. Los requisitos necesarios para alcanzar predicciones o explicaciones cotidianas adecuadas no son muy estrictos. a) Se pueden utilizar varios tipos de conocimientos de manera adecuada en diferentes contextos, sin que haga falta una gran generalidad ni una coherencia global. Por tanto, podemos utilizar con eficiencia grandes cantidades de conocimientos específicos de un contexto (basados en la experiencia diaria, el sentido común o la tradición) sin tener que hacer inferencias extensivas o explícitas. b) El conocimiento requerido rara vez debe ser excesivamente preciso. Algunas ambigüedades y vagedades son tolerables y normalmente pueden ser resueltas de manera adecuada mediante refinamientos o discusiones en contextos específicos. c) Rara vez hacen falta cadenas largas de inferencias precisas, aunque algunos tipos de inferencias moderadamente largas [por ejemplo, trabajar hacia atrás con subobjetivos sucesivos (Klahr, 1978)] pueden ser fáciles de tratar.

Requisitos científicos estrictos. La consecución de los objetivos científicos de una predicción y una explicación óptimas impone requisitos muy estrictos. a) Existe la necesidad de una gran generalidad y, en consecuencia, de largas cadenas de inferencias, para garantizar que un número muy pequeño de premisas teóricas pueda llevar a predicciones sobre fenómenos muy diversos. b) La coherencia debe mantenerse a través de toda la estructura de conocimiento científico para garantizar que distintos argumentos no conduzcan a predicciones contradictorias. c) Todo conocimiento científico necesita ser especificado con precisión para que se puedan realizar predicciones sin ambigüedad y con el grado de precisión deseado. Los párrafos que siguen profundizan en algunas consecuencias de estos requisitos.

1. *Centrarse en las inferencias.* El objetivo científico fundamental implica menos interés en la mera explicación. En palabras del físico William Bragg, «Lo importante en ciencia no es tanto obtener nuevos datos como descubrir nuevas maneras de pensar sobre ellos».

2. *Construcción deliberada del conocimiento.* El conocimiento científico se construye y se refina deliberadamente para alcanzar un poder explicativo y predictivo óptimo. Como dijo Einstein (1954, p. 323), «La ciencia es el intento de hacer que la diversidad caótica de nuestra experiencia sensorial se corresponda con un sistema de pensamiento lógicamente uniforme». Aún con más claridad, afirma (Holton, 1988, p. 251) que «Nos interesan las antítesis eternas entre los dos componentes inseparables de nuestro conocimiento, lo empírico y lo racional ... La estructura del sistema es el trabajo de la razón; los contenidos empíricos y sus relaciones mutuas deben encontrar su representación en las conclusiones de la teoría. En la posibilidad de esta representación estriba el valor y la justificación exclusivos del sistema entero y especialmente los conceptos y los principios fundamentales subyacentes. Aparte de esto, los últimos son invenciones libres del intelecto humano que no se pueden justificar ni por la naturaleza de ese intelecto ni por cualquier otro modo a priori».

En consecuencia, el conocimiento científico nunca es absolutamente verdadero sino que es una construcción teórica que se debe refinar constantemente. Por tanto, Einstein (1954, p. 323) afirma que las ideas científicas son «hechas por el hombre», son «el resultado de un proceso de adaptación extremadamente laborioso» y, por tanto, también son «hipotéticas, nunca completamente finales, siempre puestas en cuestión o en duda». El etólogo Konrad Lorenz afirma, de manera similar: «La verdad en la ciencia se puede definir como la hipótesis de trabajo más adecuada para abrir el camino a la siguiente hipótesis más adecuada». Por tanto, el conocimiento científico es el resultado de un proceso continuo de refinamiento progresivo en el que teorías científicas de validez limitada se suelen utilizar como trampolín hacia teorías más generales y precisas.

3. *La necesidad de trascender el conocimiento existente.* La persecución sistemática de objetivos científicos implica la necesidad de trascender las concepciones existentes. Por tanto, nociones de sentido común aparentemente evidentes suelen ser abandonadas en favor de nuevos conceptos deliberadamente inventados para predecir y explicar fenómenos mucho más amplios que los encontrados en la vida de cada día. Por ejemplo, podemos necesitar tomar conciencia de que el tiempo entre dos sucesos es diferente para observadores distintos (teoría de la relatividad), o que carece de sentido hablar del camino recorrido por una partícula atómica (teoría cuántica). Ciertamente, la física de las partículas elementales contemporánea está caracterizada por una gran libertad de inventiva teórica sin ningún tipo de limitación impuesta por el sentido común de cada día. Bridgman (1955, p. 81) observó: «[Cuando trabaja, el científico] siente una libertad total para utilizar cualquier método o dispositivo que en la situación concreta que tiene ante él parezca que pueda aportar la respuesta correcta. En su ataque a un problema concreto no sufre ninguna inhibición por parte de precedentes o autoridades sino que es completamente libre de seguir cualquier curso que su ingenio sea capaz de sugerirle».

También se da una necesidad de trascender las creencias tradicionales o las opiniones de personajes con autoridad, en ocasiones incluso las de grandes científicos. Se dice de Richard Feynman que, en una ocasión, afirmó; «La ciencia es la creencia en la ignorancia de los expertos». Por ejemplo, en 1959 Josephson, entonces un modesto estudiante graduado, predijo la posibilidad de que se diera una corriente superconductor entre dos metales superconductores muy juntos. En esa época, el famoso físico John Bardeen, padre de la teoría sobre la superconductividad, expresó unas firmes dudas al respecto. Sin embargo, el efecto predicho fue buscado y encontrado, y llevó a la concesión de un premio Nobel a Josephson.

Incrementar la distancia entre los ámbitos científico y cotidiano. «El conjunto de la ciencia no es más que un refinamiento del pensamiento cotidiano». Esta afirmación de Einstein (1954, p.290) es totalmente verdadera. Sin embargo, tal refinamiento ha sido muy sustancial. El objetivo científico fundamental de una predicción y una explicación óptimas es una extensión muy ambiciosa de los más modestos objetivos predictivos y explicativos de la vida de cada día y, en consecuencia, impone unos requisitos mucho más estrictos. Además, los progresos científicos realizados durante varios siglos han desembocado en un conocimiento científico cada vez más voluminoso, más preciso, más abstracto y simbólico y más propenso a tratar con fenómenos y conceptos que no se encuentran nunca en la vida de cada día (por ejemplo, partículas atómicas, genes, velocidades cercanas a la de la luz, etc.). Como resultado, la distancia entre el conocimiento científico y el de la vida de cada día se ha ido haciendo cada vez más grande.

Implicaciones para el aprendizaje

No es de sorprender que los estudiantes tiendan a importar nociones de objetivos cotidianos al ámbito científico, con el resultado de que suelen aspirar a objetivos inadecuados en su estudio de la ciencia. Por tanto, la mayoría de los estudiantes no

comparten el interés de los científicos en realizar inferencias y en trascender el conocimiento existente.

Centrarse en el conocimiento objetivo. Muchos estudiantes consideran que el conocimiento científico es, principalmente, una colección valiosa de datos y fórmulas en vez de una estructura conceptual que permite la realización de numerosas predicciones. De ahí que se esfuercen principalmente en memorizar diversos datos y fórmulas científicos en vez de aprender unos cuantos principios y métodos de razonamiento básicos que les permitan realizar diversas inferencias. De manera similar, suelen centrarse en el aprendizaje de soluciones a problemas estándar en vez de hacerlo en el aprendizaje de métodos de pensamiento necesarios para resolver problemas desconocidos. Estos objetivos de aprendizaje tienen consecuencias de gran alcance porque conducen a los estudiantes a adquirir conocimientos inertes que no se pueden utilizar con flexibilidad.

Aceptación del conocimiento existente. Los estudiantes tienden a aceptar nociones de sentido común. Encuentran difícil creer que pueden carecer de sentido o ser inútiles en el ámbito científico (por ejemplo, el movimiento o el tiempo especificados sin un marco de referencia). A la inversa, tienen dificultades para apreciar que conceptos inventados artificialmente (por ejemplo, el momento angular, la capacidad eléctrica, etc.) pueden ser muy significativos y útiles.

De manera similar, los estudiantes son propensos a aceptar de una manera no crítica conocimientos adquiridos de fuentes con autoridad como enseñantes o libros de texto, aunque sean incapaces de interpretarlos correctamente o de conectarlos con observaciones. Por ejemplo, muchos estudiantes afirman que no es cierto que el sol se mueva en torno a la tierra (a pesar de sus propias observaciones que indican lo contrario) porque han aprendido en la escuela que es realmente la tierra la que se mueve en torno al sol. Por tanto, los estudiantes están completamente preparados para aceptar la autoridad de los enseñantes y de científicos como Copérnico o Galileo, sin comprender la relatividad del movimiento y las implicaciones de la observación.

Además, los estudiantes suelen traer consigo nociones cotidianas de verdad absoluta y nociones ingenuas de que la ciencia ofrece esa verdad. Por tanto, en ocasiones encuentran que es difícil aceptar que las teorías científicas son modificables y mejorables, que la ciencia no es necesariamente exacta, que puede ser útil trabajar con teorías científicas aproximadas y que puede ser conveniente realizar aproximaciones aunque se disponga de teorías precisas (véase, por ejemplo, Songer y Linn, 1991).

El papel de la ciencia escolar

Los cursos de ciencias impartidos en las escuelas suelen tender a reforzar las concepciones que los estudiantes tienen de los objetivos y, por tanto, tienden a centrarse en objetivos significativamente diferentes de los de la ciencia real. a) Las políticas de examen y de calificación suelen recompensar más la memorización de datos y fórmulas que la capacidad de utilizar este conocimiento de una manera flexible. b) Los libros de texto suelen destacar las fórmulas matemáticas, en ocasiones hasta el punto de mostrar puras listas de ellas (por ejemplo, véase Ohanian, 1985, p. 563). c) Los objetivos en el entorno escolar se centran principalmente en satisfacer criterios especificados por enseñantes, libros de texto, exámenes y otras fuentes legitimadas de autoridad. Sin embargo, a diferencia de la ciencia y de la vida cotidiana, estos criterios con frecuencia solo están conectados muy remotamente a fenómenos naturales directamente observables.

Objetivos de trabajo

Para servir a los objetivos principales indicados en la Figura 2, un ámbito de conocimiento requiere la búsqueda rutinaria de algunos objetivos de trabajo, espe-

cialmente los orientados a conseguir la comprensión y evaluar la validez. Pero los criterios para determinar la comprensión o la validez y los métodos para alcanzarlas difieren significativamente en la vida de cada día y en la ciencia.

Comprensión

Comprensión cotidiana. En la vida de cada día, el conocimiento no suele buscarse deliberadamente sino que se adquiere espontáneamente mediante la interacción con el mundo y con otras personas. Por tanto, en ocasiones las personas dicen que comprenden algo meramente porque tienen experiencia con ello. También pueden decir que comprenden aspectos del mundo si pueden explicarlos o predecirlos lo suficientemente bien como para verles algún sentido e interactuar con ellos satisfactoriamente. La experiencia pasada y el conocimiento local sobre contextos específicos son en general bastante adecuados para esas predicciones y explicaciones comúnmente necesarias (por ejemplo, una idea general de que una lámpara requiere un flujo ininterrumpido de electricidad es suficiente para comprender por qué una lámpara puede funcionar mal y para sugerir que se compruebe si está o no enchufada, si la bombilla está bien enroscada y si el cable está dañado).

No existen criterios bien definidos de lo que constituye la comprensión en la vida de cada día. En particular, no existen requisitos para realizar cadenas de inferencias basadas en premisas y reglas de inferencia bien especificadas. Por tanto, las personas pueden afirmar que comprenden algo porque pueden relacionarlo, mediante argumentos razonables, con el sentido común o con otro conocimiento familiar para ellas. De manera similar, la comprensión de algo puede ser demostrada mediante explicaciones que meramente identifican un agente causal percibido o destacan alguna conexión entre características relevantes. Estas explicaciones no solo son comunes entre niños (Metz, 1991) sino también entre adultos.

Como se ilustra en el anterior ejemplo de la lámpara, esta comprensión es suficiente para la mayoría de las situaciones cotidianas. Ciertamente, esforzarse por lo que los científicos denominan comprensión requiere una motivación que va más allá del funcionamiento cotidiano satisfactorio.

Comprensión científica. En cambio, la comprensión en el ámbito de la ciencia es un objetivo de trabajo buscado deliberadamente con el fin de servir al objetivo fundamental de explicar y predecir con frugalidad tantos fenómenos observables como sea posible. Ciertamente, suelen realizarse esfuerzos deliberados para comprobar los límites de la comprensión científica y para ampliar esta comprensión si se encuentra que es deficiente.

Los criterios de la comprensión científica están bien especificados. a) La comprensión se debe demostrar mediante la capacidad de realizar muchas inferencias diversas, o bien predicciones que implican realizar inferencias sobre fenómenos observables a partir de premisas básicas, o bien explicaciones que implican inferencias que muestran cómo se pueden deducir fenómenos observables a partir de premisas básicas. b) La comprensión científica nunca es absoluta: es una noción comparativa. Por tanto, se dice que nuestra comprensión es mayor en la medida en que seamos capaces de predecir y explicar una gama más amplia de fenómenos diversos sobre la base de menos premisas. c) Las premisas básicas son los postulados bien especificados de alguna teoría, y razonar a partir de estos postulados se consigue mediante las reglas de inferencia de la lógica deductiva. d) La necesidad de predicciones o explicaciones frugales implica que la demostración de la comprensión puede implicar largas cadenas de inferencias únicamente a partir de unas cuantas premisas básicas.

Como base para la comprensión se pueden utilizar distintas premisas teóricas dependiendo de lo que es posible o deseable. Por ejemplo, podemos comprender las propiedades de un gas a partir de las premisas macroscópicas de una teoría termodinámica, o también podemos comprenderlas con mayor detalle (con más poder pre-

dictivo y explicativo, aunque a costa de inferencias más complejas) a partir de teorías atómicas y conceptos estadísticos más detallados.

Las premisas teóricas utilizadas como base para la comprensión pueden ser muy abstractas y estar muy alejadas de cualquier noción de sentido común. Por ejemplo, el color amarillo de las lámparas de sodio se puede comprender científicamente a partir de premisas muy abstractas de mecánica cuántica y teoría electromagnética.

Validez

Validez cotidiana. En la vida de cada día, se suele presuponer que el conocimiento es válido y fiable a menos que haya fuertes evidencias para creer lo contrario. Por tanto, normalmente no se percibe con fuerza la necesidad de comprobar la validez de un conocimiento.

La noción de validez en la vida de cada día no está claramente definida y los criterios para determinar la validez no están especificados explícitamente. Cuando la validez debe ser evaluada (por ejemplo, cuando es puesta en duda por otra persona), los argumentos normalmente propuestos en favor de la validez están en consonancia con observaciones pasadas, con el sentido común o con otros conocimientos razonables. Entre otras bases para la validez se incluyen la tradición, los grupos sociales o las autoridades respetadas.

Validez científica. En cambio, evaluar la validez del conocimiento científico es un objetivo de importancia crucial, buscado persistentemente para conseguir alcanzar el objetivo científico fundamental de una predicción y una explicación eficaces. La validez debe ser cuidadosamente comprobada para garantizar que las inferencias realizadas a partir de premisas básicas estén libres de errores y lleguen a conclusiones lógicas y, por tanto, para garantizar también la corrección y la coherencia de un cuerpo completo de conocimientos científicos. Además, las discrepancias descubiertas al intentar realizar una validación ayudan a revelar deficiencias del conocimiento científico existente e indican dónde es necesario hacer modificaciones.

Esta gran necesidad de comprobar la validez motiva una comprobación deliberada de las observaciones mediante la replicación de experimentos y la obtención de líneas de evidencia convergentes. También conduce al empleo habitual de pruebas formales o argumentos justificados explícitamente para garantizar que las inferencias son válidas y para convencer a otras personas de su validez.

Los criterios de validez científica están bien especificados. En última instancia, los criterios están de acuerdo con las observaciones. En segundo lugar, están de acuerdo con inferencias basadas en premisas teóricas bien establecidas, aceptadas a causa de su poder para predecir y explicar una amplia gama de observaciones. Así pues, en este segundo caso los criterios de validez coinciden con los de la explicación científica, es decir, una afirmación se considera válida porque puede explicarse en base a premisas científicas bien establecidas.

Implicaciones para el aprendizaje

Los anteriores comentarios comparativos conducen a la expectativa de que los estudiantes importarán nociones de comprensión y validez de la vida de cada día al ámbito científico en el que esas concepciones son ingenuas o inadecuadas. A continuación presentamos algunos ejemplos.

La familiaridad como criterio para la comprensión. Como la comprensión cotidiana suele adquirirse mediante la experiencia y un aprendizaje implícito, los estudiantes suelen utilizar la familiaridad como criterio para la comprensión, en vez de utilizar el criterio científico que requiere demostrar la capacidad de realizar muchas inferencias

diversas. Por tanto, pueden afirmar que comprenden el principio básico de la mecánica de Newton ($F = m a$) porque pueden enunciarlo y lo han estudiado, aunque puedan tener poca capacidad para aplicarlo en la resolución de diversos problemas. Por ejemplo, cuando obtienen una mala nota en una prueba en la que no han resuelto problemas basados en este principio, se sienten agraviados y disgustados porque creen que (en base a su noción cotidiana de la comprensión) realmente «comprenden» el principio de todas maneras.

Aceptación de explicaciones que carecen de base científica. Los estudiantes suelen utilizar el razonamiento cotidiano (percepción directa y sentido común) para ofrecer explicaciones que carecen de base científica. Por ejemplo, puede parecer sensato pensar que una partícula en movimiento que sale de un tubo curvo sigue durante un tiempo una trayectoria curva; o que un objeto se mueve siguiendo la dirección de la fuerza que se le aplica; o que algunas características adquiridas durante la vida de un animal se transmiten a su descendencia. No es infrecuente que los estudiantes ofrezcan explicaciones basadas en argumentos tan plausibles aun después de haber asistido a cursos de ciencias en los que han aprendido ostensiblemente principios científicos cuya aplicación llevaría a conclusiones completamente diferentes. Por tanto, los métodos normales de enseñanza solo tienen una eficacia limitada para transmitir a los estudiantes los requisitos de la explicación científica.

No aceptación de explicaciones que tienen una base científica. Como algunas explicaciones científicas formalmente correctas pueden no parecer «sensatas» o estar en desacuerdo con criterios de explicación cotidianos, en ocasiones los estudiantes no las encuentran satisfactorias. Por ejemplo, cuando la resistencia del aire es despreciable, un proyectil se mueve con una velocidad horizontal constante. Según las leyes de la mecánica de Newton, la razón es que sobre el proyectil no actúa ninguna fuerza horizontal. Pero algunos estudiantes encuentran que esta explicación no es satisfactoria porque no cumple con los requisitos cotidianos de una explicación en consonancia con el sentido común. Aún encuentran que es más difícil aceptar explicaciones basadas en las leyes más abstractas de la mecánica cuántica.

Consecuencias para el aprendizaje. Las nociones que los estudiantes tienen de la comprensión presentan consecuencias de gran alcance para su aprendizaje. a) Estas nociones determinan los objetivos de aprendizaje de los estudiantes y la manera en que concentran su atención. b) También determinan cuando los estudiantes están satisfechos con su propio aprendizaje y dejan de esforzarse más.

De ahí que las nociones cotidianas que los estudiantes tienen de la comprensión influyan enormemente en lo que aprenden en ciencias y en lo bien que lo llegan a aprender. En particular, muchos estudiantes no se orientan hacia el objetivo científico de la comprensión que se demuestra en la capacidad de hacer inferencias extensas. Como resultado, suelen adquirir conocimientos científicos inertes que no se pueden utilizar con flexibilidad.

Consecuencias de las nociones de validez. Los estudiantes, que entran en la ciencia procedentes de la vida de cada día, suelen sentir poco la necesidad de una validación explícita del tipo empleado en la ciencia; así, por ejemplo, sienten poco la necesidad de justificar los pasos de un argumento en términos de premisas científicas básicas. Además, al carecer de criterios claros para la explicación científica, también tienden a afirmar la validez a partir de criterios no científicos mal especificados, como la conformidad con el sentido común o la intuición.

A continuación presentamos algunos ejemplos: a) Cuando se les pregunta cuál es la aceleración de un péndulo en el extremo de su oscilación, muchos estudiantes responden erróneamente que la aceleración en ese punto es cero porque su velocidad es cero. Llegan a esta respuesta errónea y no la someten a prueba porque no perciben la necesidad de justificarla en términos de la definición científica de la aceleración (Reif y Allen, en prensa). b) Cuando se les pregunta cuál es la magnitud de la fuerza ejercida por la cuerda de un péndulo en oscilación cuando su masa, que pesa 1 kg, se encuentra en el punto inferior de su trayectoria, muchos estudiantes responden inco-

rectamente que la fuerza es de 1 kg porque ese es el peso del péndulo o porque la fuerza de la cuerda debe compensar la fuerza de la gravedad. Tampoco ahora perciben la necesidad de justificar su respuesta en términos del principio básico de la mecánica de Newton según el cual $F = 'm a$, que ya han estudiado con detalle y cuya aplicación conduciría a una respuesta muy distinta. c) Cuando se enfrentan al problema de idear una construcción geométrica, muchos estudiantes acometen la tarea empíricamente con regla y compás sin llegar a darse cuenta de la necesidad de probar la validez de su método de construcción (Schoenfeld, 1985, p. 160).

El papel de la ciencia escolar

Comprensión. Los cursos de ciencias impartidos en las escuelas no suelen fomentar el objetivo científico de la comprensión e, inadvertidamente, incluso pueden llegar a desvirtuarlo. a) Muchos cursos estimulan y recompensan la memorización de conocimientos y no la capacidad de realizar diversas inferencias que conduzcan a una comprensión científica. b) Estos cursos pueden formar más a los estudiantes en la ejecución de tareas totalmente rutinarias que en las inferencias necesarias para abordar situaciones desconocidas. c) Suelen enseñar técnicas de manipulación de símbolos formales pero no capacitan a los estudiantes para realizar inferencias cualitativas que demuestren una comprensión más flexible.

Validez. La mayoría de los cursos de ciencias realmente destacan la importancia de la validez. Pero muchos estudiantes perciben esta importancia principalmente como un requisito pedante impuesto por enseñantes, libros de texto y exámenes. Un número relativamente bajo de ellos consideran que la habitual comprobación de la validez mediante criterios científicos es intrínsecamente importante para garantizar la corrección y la coherencia de su conocimiento.

La cognición en los ámbitos cotidiano y científico

El conocimiento, tanto en la ciencia como en la vida de cada día, no es solo una colección incorpórea de afirmaciones, principios y métodos objetivos. Todo este conocimiento es creado, aplicado y aprendido por seres humanos y, en consecuencia, depende fundamentalmente de los procesos cognitivos humanos. En palabras de Einstein (Holton, 1988, p. 6): «La ciencia, como [cuerpo de conocimientos] existente y finalizado, es [la cosa] más objetiva e impersonal que conocen los hombres, [aunque] la ciencia como algo que está llegando a ser, como objetivo en sí, es algo tan subjetivo y psicológicamente condicionado como cualquier otro empeño humano». En consecuencia, apartaremos ahora nuestra atención de los objetivos de un ámbito para dedicarla a la cognición que en cada ámbito sirve a esos objetivos.

Características de la cognición humana. En cualquier ámbito, la cognición está influida por las características generales de la cognición humana. Como se indica en la Figura 1, el sistema cognitivo humano presenta algunas capacidades destacadas. a) Posee memoria asociativa a largo plazo de una capacidad casi ilimitada. b) Puede ejecutar fácilmente procesos perceptivos complejos y reconocer pautas visuales. c) Puede realizar tareas complejas deliberadamente y, tras una práctica adecuada, llega a ser capaz de realizar algunas de estas tareas de una manera casi automática, sin atención consciente.

Por otra parte, el sistema cognitivo humano está sometido a algunas limitaciones importantes. a) Tiene capacidades limitadas de atención y de memoria a corto plazo. Estas limitaciones reducen el control fiable de los procesos cognitivos y contribuyen a la propensión a los errores. b) Tiene una velocidad de tratamiento limitada. c) Sin un entrenamiento especial, tiene una capacidad limitada para el razonamiento abstracto (Johnson-Laird, 1983).

Adaptación a distintos ámbitos de conocimiento. De alguna manera, el mismo sistema cognitivo humano debe abordar con eficacia las demandas de ámbitos de conocimiento completamente distintos como, por ejemplo, los de la vida diaria y la ciencia. De ahí que las personas hayan desarrollado medios cognitivos consecuentemente distintos y bien adaptados para alcanzar los distintos objetivos de estos ámbitos.

En los párrafos que siguen examinaremos los medios cognitivos, detallados en las Figuras 1 y 2, importantes en cualquier ámbito de conocimiento: a) Una estructura de conocimiento que contenga conceptos adecuadamente especificados y esté apropiadamente organizada para facilitar su aplicación. b) Tipos de métodos útiles para resolver diversos problemas. c) Medios de garantizar que el conocimiento disponible se utiliza sin error y con eficacia.

En particular, nos interesaremos en comparar cómo se implementan de manera diferente estos medios cognitivos en los ámbitos cotidiano y científico, y en algunas implicaciones para el aprendizaje de estudiantes que abordan el ámbito desconocido de la ciencia.

Estructura de conocimiento

Los bloques básicos del conocimiento en cualquier ámbito son los conceptos (junto con las palabras u otros símbolos utilizados para denotarlos) y las relaciones entre esos conceptos. Este conocimiento conceptual también debe organizarse adecuadamente para facilitar las tareas necesarias para alcanzar los objetivos del ámbito. Pero los distintos objetivos y requisitos de la vida de cada día y de la ciencia implican unas diferencias correspondientes en la estructura del conocimiento en cada uno de esos ámbitos.

Especificación de conceptos

Como se indica en el rectángulo recuadrado en negro en la Figura 1, deben existir especificaciones adecuadas sobre cómo se conectan los conceptos con sus referentes, es decir, con otros conceptos y, en última instancia, con las observaciones que pretenden describir.

Especificación de conceptos cotidianos. En la vida de cada día, las conexiones entre los conceptos y sus referentes no suelen especificarse con gran precisión. Además, los conceptos no deben estar necesariamente relacionados con fenómenos observables (por ejemplo, en la fantasía, en las religiones y otros sistemas de creencias, etc.).

Por tanto, los conceptos cotidianos suelen captar a grandes rasgos la estructura de similitud de una colección de elementos observables, y las relaciones entre conceptos se basan en una historia de asociaciones (Rosch, 1978). Los conceptos pueden idearse y modificarse sin limitaciones rígidas siempre y cuando parezcan razonables y permitan la comunicación. Además, con frecuencia se pueden identificar eficientemente en base a procesos de reconocimiento, comparación perceptiva con casos prototípicos y analogías (Smith y Medin, 1981). Estos procesos son rápidos y fáciles. Además, las ambigüedades que resultan de especificaciones imprecisas de conceptos, normalmente se pueden resolver adecuadamente en base a aproximaciones sucesivas y comunicaciones interpersonales.

Los conceptos cotidianos suelen aprenderse sin ningún esfuerzo explícito. Por ejemplo, cuando las calculadoras llegaron a ser algo normal, pocos de nosotros buscaron explícitamente el objetivo de aprender los atributos definitorios de estos aparatos.

Especificación de conceptos científicos. En cambio, el objetivo científico del poder predictivo frugal y extensivo impone requisitos exigentes en los conceptos científicos. a) Estos conceptos deben definirse con precisión y no deben conducir a incohe-

rencias. b) Dentro de estas limitaciones, se pueden inventar libremente conceptos científicos si ello parece útil, independientemente del sentido común o de otras preconcepciones. En palabras de Einstein (1954, p. 13), «Todos los conceptos, incluso los más cercanos a la experiencia son, desde el punto de vista de la lógica, convencionalismos libremente elegidos». c) Muchos conceptos científicos (por ejemplo, campo magnético, función de onda, gen, ...) necesitan ser muy generales para permitir predicciones frugales. Pero a pesar de su generalidad, deben poder ser interpretados sin ningún tipo de ambigüedad en cualquier caso concreto, aunque la cadena de razonamiento sea larga e indirecta. d) Todos los conceptos deben estar conectados, en última instancia, con observaciones; de no ser así carecen de significado científico puesto que son irrelevantes para el objetivo científico fundamental de predecir y explicar fenómenos observables. De nuevo en palabras de Einstein (1954, p. 291): «Los conceptos, las relaciones y, ciertamente, la postulación de objetos reales y, hablando en general, de la existencia del «mundo real», solo tienen justificación en la medida en que estén conectados con impresiones sensoriales entre las cuales establezcan una conexión mental».

Para satisfacer los requisitos precedentes, los conceptos científicos se deben definir explícitamente para especificar conexiones sin ambigüedades con sus referentes y, en última instancia, con fenómenos observables. Los conceptos pueden especificar o bien entidades (entidades particulares como «el sol» o entidades genéricas como «partícula» o «triángulo») o bien propiedades asociadas con ellas (por ejemplo, «masa», «aceleración», etc.). La conexión entre un concepto y observaciones se puede realizar de la manera más explícita mediante una definición operacional formal que especifique lo que realmente debemos hacer para determinar el valor (incluyendo la pertenencia a categorías) del concepto en cualquier situación determinada. Se pueden utilizar procesos de reconocimiento especificados con menos precisión para identificar con eficacia conceptos científicos familiares; pero estas identificaciones de conceptos deben ser coherentes con las definiciones formales (Reif, 1987a).

Organización del conocimiento

Organización del conocimiento cotidiano. El conocimiento cotidiano consta de conceptos interrelacionados que forman una gran red de elementos asociados entre sí. a) El nuevo conocimiento se adquiere automáticamente mediante la experiencia y se almacena junto con información que refleja su contexto de adquisición pero sin ninguna integración global. b) El conocimiento resultante puede ser solo localmente coherente, es decir, puede que solo sea posibles hacer inferencias entre elementos de conocimiento estrechamente asociados y se pueden producir contradicciones. Pero la coherencia local es suficiente para garantizar una coherencia adecuada del conocimiento en contextos específicos. c) Se pueden recuperar adecuadamente elementos de conocimiento relevantes en respuesta a indicaciones ofrecidas por diversos contextos.

Organización del conocimiento científico. En la ciencia, el conocimiento se debe organizar para facilitar el objetivo central de hacer inferencias extensivas a partir de muy pocas premisas básicas. a) En consecuencia, el conocimiento científico debe ser muy coherente, es decir, debe permitir que se puedan inferir muchos elementos de conocimiento solamente a partir de unos pocos. Esta coherencia también garantiza la coherencia global de toda la estructura de conocimiento. b) El conocimiento se debe organizar para que las relaciones lógicas entre los elementos de conocimiento sean muy explícitas. Por ejemplo, las formas jerárquicas de organización son útiles para una clasificación efectiva y también facilitan la realización de inferencias deductivas a partir de unas pocas premisas generales para llegar a resultados detallados más numerosos. (Esta organización se superpone a la estructura de la memoria asociativa y puede coexistir con otras asociaciones ilógicas entre elementos de conocimiento).

La coherencia y la organización lógica facilitan los siguientes procesos cognitivos importantes en la ciencia (Eylon y Reif, 1984): a) Recordar con precisión muchos conocimientos y regenerarlos si se olvidan en parte. b) Evitar incoherencias y contradicciones. c) Ampliar el conocimiento ya que la estructura de conocimiento ayuda en las deducciones, sugiere inferencias plausibles y, con frecuencia, suele incorporar nuevos conocimientos a una estructura lógica preexistente.

Estas ventajas se obtienen mediante esquemas taxonómicos de clasificación como los utilizados en biología y en en medida aún mayor mediante las organizaciones de conocimientos lógicos altamente coherentes que predominan en las ciencias físicas. Por ejemplo, toda la mecánica clásica se basa deductivamente en las tres leyes de la mecánica de Newton, y todos los fenómenos eléctricos y magnéticos (incluyendo las ondas de radio y la óptica) se pueden comprender en gran medida partiendo de las cuatro ecuaciones fundamentales del electromagnetismo de Maxwell.

Implicaciones para el aprendizaje

Cuando llegan a la ciencia procedentes de la vida de cada día, muchos estudiantes no perciben la necesidad de especificar los conceptos sin ambigüedades, ni tienen experiencia con el pensamiento formal necesario para alcanzar esas especificaciones. De manera similar, no perciben completamente la necesidad de organizar su conocimiento científico acabado de adquirir para que sea globalmente coherente y lógicamente consistente, ni es fácil para ellos conseguirlo. Como resultado, los estudiantes suelen transferir al ámbito científico métodos informales para especificar conceptos y organizaciones de conocimientos de carácter predominantemente asociativo que son eficientes en la vida de cada día pero son inadecuados para la ciencia.

Conceptos inadecuadamente especificados. Siguen algunos ejemplos: a) Los estudiantes de cursos de ciencias suelen sentirse libres de emplear palabras especiales como «energía» o «momento» sin adjuntarles significados científicos claros. b) Aprenden a identificar y reconocer varios conceptos científicos (por ejemplo, «componente de un vector», «resistencias en paralelo», etc.) mediante una comparación visual con casos prototípicos. Pero con frecuencia no pueden especificar estos conceptos explícitamente y, en consecuencia, no pueden identificarlos adecuadamente en situaciones atípicas (Reif, 1987a). c) Aunque los estudiantes pueden ser capaces de enunciar las definiciones de conceptos científicos (por ejemplo, el concepto de «aceleración»), con frecuencia no saben qué hacer para aplicar estas definiciones a casos específicos (Labudde, Reif y Quinn, 1988; Reif y Allen, en prensa).

Conocimiento incoherente. Además, el conocimiento que tienen los estudiantes de los conceptos y principios científicos suele ser fragmentario (diSessa, 1988). Por ejemplo, incluso los estudiantes universitarios suelen exhibir conocimientos incoherentes sobre conceptos tan elementales como «área». En general conocen varias fórmulas para calcular las áreas de figuras geométricas simples como rectángulos, triángulos y círculos; pero con frecuencia no pueden enunciar una definición general de área ni utilizarla para deducir sus fórmulas en caso necesario.

De manera similar, los estudiantes suelen recordar diversos fragmentos de conocimientos sobre la aceleración de una partícula como, por ejemplo, fórmulas para la aceleración de una partícula que se mueve siguiendo una trayectoria circular. Pero su conocimiento es incoherente y con frecuencia erróneo a causa de condiciones de aplicabilidad omitidas, y no es comprobable comparándolo con una definición básica (Reif y Allen, en prensa). Como resultado, los estudiantes se ven conducidos con frecuencia a incoherencias que no pueden resolver (por ejemplo, pueden no saber si decir que la aceleración de una bola lanzada verticalmente es nula en su punto más alto porque su velocidad es cero o si es diferente de cero porque la dirección de su velocidad está cambiando).

Como el conocimiento científico adquirido por los estudiantes carece de coherencia, para ellos es difícil aprender y recordar. Por ejemplo, los estudiantes suelen quejarse de que la física tenga tantas fórmulas que recordar. Por contra, los físicos, como su conocimiento es coherente y está bien organizado, suelen proclamar con orgullo que la gran belleza de la física (a diferencia, por ejemplo, de la química orgánica) es que tiene muy pocas cosas que recordar.

Papel de la ciencia escolar

Normalmente, los cursos de ciencias enseñan muchos términos científicos. Pero aunque los conceptos se especifiquen adecuadamente mediante expresiones definitorias, los métodos necesarios para interpretar estas expresiones en casos específicos muy rara vez se enseñan o son practicadas por los alumnos de una manera explícita. Como resultado, los estudiantes con frecuencia se quedan con conceptos que no son capaces de interpretar con fiabilidad (por ejemplo, Halloun y Hestenes, 1985a; McDermott, 1984; Reif y Allen, en prensa).

Ciertamente, los cursos de ciencias de las escuelas ponen cierto énfasis en la estructura lógica. Pero normalmente se centran más en el contenido de los conocimientos transmitidos que en su organización, especialmente su organización en las mentes de los estudiantes y no meramente en las lecciones o en los libros de texto. Además, poner énfasis en las fórmulas suele oscurecer ideas generales que harían que el conocimiento de los estudiantes fuera más coherente. Por ejemplo, fórmulas como $F = m \cdot a$ a muy bien pueden memorizarse sin adquirir una comprensión general de la estrecha relación entre movimiento e interacción.

MÉTODOS

La necesidad de realizar inferencias para solucionar problemas es general, tanto en la vida de cada día como en la ciencia. Se plantea siempre que deseamos alcanzar algún objetivo y necesitamos idear una secuencia de acciones que nos conduzcan a ese objetivo.

La principal dificultad de la resolución de problemas es la necesidad de tomar decisiones sensatas para poder elegir, de entre muchas acciones posibles, la secuencia de acciones concreta (o una de las pocas secuencias adecuadas) que conduzca al objetivo deseado. Por tanto, necesitamos métodos efectivos para tomar decisiones sensatas y, como requisito previo, también métodos efectivos para describir los problemas de una manera que ponga de manifiesto las acciones potencialmente prometedoras entre las que podemos escoger. Por último, hacen falta métodos para implementar todas las acciones que hayamos elegido.

Como el objetivo científico es realizar predicciones extensivas y precisas a partir de muy pocas premisas, las cadenas de inferencias necesarias para resolver problemas científicos normalmente deben ser mucho más largas y precisas que las necesarias para solucionar problemas cotidianos. Por tanto, los métodos requeridos para abordar problemas científicos deben tener unos niveles de refinamiento correspondientes.

El ámbito cotidiano

Los problemas cotidianos suelen poderse resolver partiendo de grandes cantidades de conocimientos acumulados y utilizando estos conocimientos para realizar inferencias relativamente breves en contextos particulares. Los métodos requeridos suelen basarse mucho en procesos perceptivos, reconocimiento de pautas y razona-

mientos cualitativos. Estos métodos son muy eficientes y con frecuencia suelen bastar para alcanzar objetivos cotidianos con una precisión y una coherencia adecuadas. Por ejemplo, aunque el problema de montar una cafetera para hacer café es bastante complejo, se resuelve fácilmente mediante un razonamiento cualitativo que explota pistas visuales ofrecidas por objetos del entorno (Larkin, 1989).

El ámbito científico

Aunque estos métodos también son útiles en la ciencia, por sí solos son inadecuados para la consecución de objetivos científicos. a) Normalmente no son suficientes para conseguir la falta de ambigüedad y la precisión necesarias en el trabajo científico ni para garantizar la coherencia global del conocimiento científico. b) Sobre todo, son muy inadecuados para realizar las largas cadenas de inferencias necesarias para lograr predicciones de gran alcance a partir de muy pocas premisas.

Métodos formales. En consecuencia, los científicos han ido inventando cada vez más métodos formales deliberadamente concebidos para implementar largas cadenas de inferencias con gran precisión. Estos métodos intentan aumentar las capacidades cognitivas humanas mediante la concepción de representaciones simbólicas especiales y normas y procedimientos explícitos para trabajar con ellas. Como ejemplos podemos citar muchos tipos de formalismos matemáticos (como el álgebra, el cálculo, el análisis vectorial, etc.); también podemos citar las fórmulas estructurales en química orgánica y los simbolismos especiales utilizados en biología para abordar el análisis genético y los ciclos metabólicos.

Estos métodos formales, que comportan un razonamiento preciso basado en reglas, no son compatibles de manera natural con los seres humanos (Johnson-Laird, 1983), son difíciles de aprender y requieren una formación especializada. Además, los métodos formales requieren aptitudes delicadas para interpretar adecuadamente símbolos abstractos en cualquier caso concreto.

Métodos informales. Los métodos formales no son en modo alguno suficientes para todas las tareas científicas. En particular, no son adecuados para tomar las decisiones necesarias para facilitar una investigación, es decir, para planificar la resolución de problemas, para formular subproblemas útiles para la solución de un problema, para diseñar experimentos, sugerir posibles mecanismos de efectos observados, idear nuevas teorías, etc. Estas tareas de investigación son muy importantes; además incluso unos resultados aproximados pueden ser muy útiles para estrechar el ámbito de una investigación y ofrecer una base para posteriores refinamientos. Para abordar este tipo de tareas en la ciencia es útil recurrir a métodos informales que explotan los procesos perceptivos y la capacidad para el razonamiento cualitativo de los seres humanos. Estos métodos informales son similares a los utilizados en la vida de cada día pero no son idénticos. Por tanto, están concebidos deliberadamente para ser coherentes con los métodos formales, no necesitan corresponderse con intuiciones cotidianas y pueden estar muy alejados del sentido común.

Entre los ejemplos de estos métodos informales cabe incluir el razonamiento verbal y el empleo de representaciones visuales que explotan los procesos perceptivos humanos. Algunas de estas representaciones pueden ser diagramas o imágenes que se corresponden estrechamente con percepciones directas del mundo físico (por ejemplo, diagramas de poleas o de células vivas). Pero otras pueden representar conceptos muy abstractos y alejados de las observaciones que pretenden describir (por ejemplo, gráficos de velocidad y tiempo, flechas que representan amplitudes y fases de ondas, diagramas que indican temperaturas y presiones de equilibrio para las fases sólida, líquida y gaseosa de una sustancia, etc.). Además, con frecuencia se utilizan modelos mentales sencillos junto con estas representaciones visuales para razonar cualitativamente sobre mecanismos complejos (como resistencia eléctrica, dispersión o absorción de la luz por moléculas, etc.).

Utilización complementaria de métodos formales e informales. Para abordar con eficacia y eficiencia las demandas que plantean las tareas de la ciencia, los científicos utilizan conjuntamente métodos formales e informales de una manera complementaria. Con ello pueden llegar a realizar inferencias extensivas precisas además de conseguir una creatividad flexible.

Por ejemplo, los análisis estadísticos rigurosos suelen necesitar el complemento de representaciones gráficas informales para que los resultados se puedan interpretar (Tufte, 1983, 1990). De manera similar, el análisis de muchos fenómenos complejos (por ejemplo, mecánica no lineal, caos, meteorología, etc.) no solo requiere la solución de ecuaciones diferenciales no lineales sino también una cuidadosa atención a representaciones visuales o gráficos por ordenador que puedan hacer comprensibles los resultados de esos análisis.

Incluso los físicos teóricos, que tratan los aspectos formales más matemáticos de la ciencia, expresan la necesidad de métodos informales. Por ejemplo, Einstein escribe (Hadamard, 1945): «Las palabras del lenguaje ... no parecen desempeñar ningún papel en mis mecanismos de pensamiento. Las entidades físicas que parecen actuar como elementos de pensamiento son ciertos signos e imágenes más o menos claros que pueden ser reproducidos y combinados «voluntariamente» ... antes de que se dé alguna conexión con una construcción lógica de palabras o de otros tipos de signos». De manera similar, Feynman, en su conferencia de aceptación del premio Nobel de 1965, declaró (Feynman, 1966, p. 44; también, Schwinger, 1989, p. 48): «El razonamiento de la física no ayuda a algunas personas a generar propuestas acerca de cómo relacionar lo desconocido con lo conocido. Unas teorías de lo conocido que estén descritas mediante distintas ideas de la física, pueden ser equivalentes en todas sus predicciones y, en consecuencia, ser científicamente indistinguibles. Sin embargo, no son psicológicamente idénticas cuando se trata de partir de esa base para pasar a lo desconocido». En otro ejemplo, Bethe describe el pensamiento de Fermi con estas palabras (Bernstein, 1979): «De Fermi he aprendido ... a mirar las cosas cualitativamente en primer lugar y a comprender el problema físicamente antes de empezar a rellenar papeles con fórmulas ... Fermi fue tan experimentador como teórico y, para él, la solución matemática era más una confirmación de su comprensión de un problema que la base del mismo».

Esta utilización complementaria de métodos formales e informales representa un enfoque muy sofisticado y efectivo para abordar tareas complejas de resolución de problemas en el ámbito de la ciencia.

Implicaciones para el aprendizaje

Empleo ineficaz de métodos cotidianos para la resolución de problemas. Normalmente, los estudiantes importan a la ciencia estrategias para la resolución de problemas utilizadas en la vida de cada día, donde las cadenas de inferencias son más cortas a causa de una mayor dependencia de una acumulación de conocimientos específicos de contextos. En consecuencia, cuando los estudiantes se acercan al estudio de la ciencia suelen tratar de acumular un montón de soluciones a problemas prototípicos que esperan utilizar como puntos de partida para otros problemas con que se puedan encontrar. Además, en vez de aprender estrategias generales para la toma de decisiones, tienden a centrarse estrechamente en varias ecuaciones específicas y, en consecuencia, con frecuencia dejan de ver el bosque porque se pierden entre los árboles. Estos enfoques a la resolución de problemas ni siquiera suelen ser adecuados para abordar problemas relativamente sencillos que se plantean en los cursos de introducción a la ciencia.

Dependencia inadecuada de métodos formales o de métodos informales. Al carecer de una experiencia cotidiana con métodos formales, muchos estudiantes los utilizan inadecuadamente, dependiendo en exceso de estos métodos simbólicos o de métodos

informales, sin darse cuenta de la necesidad de utilizar estos métodos conjuntamente y de una manera complementaria.

Aunque es frecuente que los estudiantes no perciban la necesidad de utilizar métodos formales o que encuentren que estos métodos son difíciles de implementar, sí que utilizan métodos informales procedentes de la vida de cada día. Por ejemplo, suelen responder a preguntas sobre el movimiento de objetos o sobre fuerzas aplicadas sobre ellos en base a lo que parece sensato, sin ningún razonamiento formal basado en el principio básico de la mecánica de Newton ($F = m a$) que han aprendido.

En cambio, muchos estudiantes dependen excesivamente de los métodos formales que se les han impartido creyendo que son la esencia de la ciencia. Sin embargo, con frecuencia no pueden interpretar adecuadamente el simbolismo en situaciones concretas y, en consecuencia, acaban aplicando símbolos de una manera despreocupada, sin utilizar el pensamiento formal como una guía o comprobación. Por ejemplo, los estudiantes pueden resolver un problema recurriendo a ecuaciones algebraicas pero sin visualizar la situación y, en consecuencia, sin darse cuenta de que el problema carece de sentido (Paige y Simon, 1966). De manera similar, cuando se les pregunta cuántos autobuses hacen falta para transportar 1128 soldados sabiendo que en cada autobús caben 36 personas, cerca de la mitad de los estudiantes encuestados en un estudio a escala nacional se enfrascaron en una larga división para llegar a respuestas tan carentes de sentido como «31 con un resto de 12» o «31 justos» tras redondear despreocupadamente el resultado (Carpenter, Linquist, Matthews y Silver, 1983).

Esta dependencia excesiva de métodos formales puede persistir hasta bien entrada la etapa universitaria. Por ejemplo, los estudiantes graduados de física aprenden muchos conocimientos formales sobre la mecánica clásica y la cuántica, la teoría electromagnética, la mecánica estadística, etc. Sin embargo, muchos de estos estudiantes descubren que estos conocimientos y estas maneras de pensar formales son totalmente insuficientes cuando llegan a realizar investigaciones y que también necesitan aprender los métodos informales utilizados con eficacia por físicos experimentados.

El papel de la ciencia escolar

Enseñanza de resolución de problemas. La resolución de problemas suele enseñarse en cursos de ciencias presentando algunos conceptos y principios científicos pertinentes, mostrando ejemplos de algunas soluciones a problemas típicos y dando a los estudiantes prácticas en la solución de problemas similares. Este método de enseñanza, que no enseña explícitamente métodos para la resolución de problemas, tiene las siguientes limitaciones: a) Los ejemplos de soluciones revelan pocas cosas acerca de los *procesos* de pensamiento necesarios para generar esas soluciones, por ejemplo, *cómo* tomar decisiones juiciosas, *cómo* evitar callejones sin salida y *cómo* salir de un atolladero. Pero la principal dificultad en la resolución de problemas con que se enfrentan los estudiantes es, precisamente, *cómo* tomar esas decisiones. b) Los ejemplos de soluciones muestran una secuencia lineal y lógica de pasos y, por tanto, sugieren a los estudiantes que los *procesos* de las soluciones son igualmente lineales. Esto no es así (como tampoco lo es que un programa informático con 1 000 líneas de instrucciones se escriba siguiendo un orden lineal) y con ello se dejan de enseñar métodos de refinamiento progresivo más potentes. c) Aunque las prácticas son verdaderamente necesarias para aprender a solucionar problemas, los estudiantes suelen dedicar mucho tiempo simplemente a «enredarse» con lo que, al final, principalmente acaban practicando técnicas inútiles y métodos pobres. Realmente, y al igual que ocurre en la enseñanza del atletismo o la música, la práctica que no está cuidadosamente diseñada puede ser inútil y hasta perjudicial, conduciendo a malos hábitos que son difíciles de eliminar.

Además, al tener que enfrentarse a las presiones de tiempo impuestas por los exámenes y los trabajos escolares, muchos estudiantes creen (con alguna justificación) que pueden abordarlas mejor memorizando resultados estándar que enfrascándose en los procesos de razonamiento más largos necesarios para una resolución de problemas de carácter sistemático.

Existen evidencias de que la enseñanza escolar suele estar muy lejos de ser efectiva para enseñar los métodos de resolución de problemas necesarios en la ciencia. Por ejemplo, nosotros encontramos (Heller y Reif, 1984) que estudiantes de Berkeley que habían completado un curso básico de física con una nota de notable o mejor, solo podían resolver correctamente cerca de un 35 por ciento de problemas de física típicos de libros de texto del tipo que encontraron repetidamente durante su curso.

Exceso de formalidad o de informalidad. Los cursos de ciencias de las escuelas raramente tienen éxito en enseñar los métodos complementarios formales e informales necesarios en ciencias. En cambio, suelen destacar indebidamente los métodos formales a costa de una comprensión más cualitativa y significativa. Como resultado, muchos estudiantes aprenden a manipular símbolos y ecuaciones, a citar definiciones o principios formales y a memorizar pruebas formales. Pero con frecuencia no pueden interpretar su conocimiento simbólico y son incapaces de utilizarlo con flexibilidad. En el otro extremo, los cursos menos rigurosos tienden a destacar el razonamiento informal sin ofrecer ninguna noción de los potentes métodos formales utilizados para alcanzar los exigentes objetivos de la ciencia.

LA CUESTION DE LA CALIDAD

La mera disponibilidad de conocimiento en cualquier ámbito no garantiza que llegue a utilizarse bien. Por tanto, necesitamos hacer referencia a un *control de calidad* adecuado, es decir, a garantizar que el conocimiento disponible se utiliza sin errores y de la mejor manera razonablemente posible. Además, necesitamos garantizar no solo que el conocimiento se utilice con eficacia, sino también con *eficiencia*, es decir, que las tareas se lleven a cabo sin un empleo indebido de tiempo y esfuerzo mental. Sin embargo, los criterios para una buena calidad y eficiencia y los correspondientes métodos necesarios para garantizar esta calidad y eficiencia, difieren en los ámbitos científico y cotidiano.

Control de calidad

Ámbito cotidiano. En la vida de cada día, los errores suelen prevenirse y corregirse suficientemente bien con medios informales, por ejemplo, observando resultados insatisfactorios o teniendo en cuenta los comentarios de otras personas. Muchos errores son considerados meros deslices porque normalmente no causan muchos problemas. Estos errores se remedian si es necesario pero normalmente no son examinados con gran detalle.

Ámbito científico. En cambio, el objetivo científico de alcanzar numerosas predicciones coherentes impone estrictos requisitos orientados a eliminar errores y otras deficiencias (por ejemplo, razonamientos voluminosos o poco claros). Además, el objetivo de la frugalidad requiere largas cadenas de inferencias a partir de muy pocas premisas y, en consecuencia, presenta muchas oportunidades para el error. Por último, como se mencionó anteriormente, los seres humanos son especialmente propensos al error al realizar cadenas de inferencias en las que intervengan símbolos abstractos.

Por tanto, un control de calidad adecuado para la ciencia requiere estrategias cognitivas concebidas especialmente. a) Existe un reconocimiento explícito de que

cabe esperar que los seres humanos cometan errores (como cualquier otro sistema funcional complejo) y que, en consecuencia, es esencial desarrollar métodos sistemáticos para eliminar esos errores. Estos métodos deben incluir métodos preventivos concebidos para evitar errores y métodos correctores concebidos para detectar, diagnosticar y corregir errores cuando se produzcan. b) Es importante identificar posibles fuentes de error con el fin de poder desarrollar métodos mejorados para abordar con fiabilidad tareas complejas y evitar conclusiones erróneas. De ahí que se dedique una sustancial atención a comprender la razón de los errores.

Los métodos de control de calidad concebidos deliberadamente para el trabajo científico van desde lo trivial a lo complejo, como indican los siguientes ejemplos: a) Se eligen símbolos cuidadosamente para reducir la carga cognitiva y facilitar importantes discriminaciones. Por ejemplo, convencionalmente se utilizan símbolos estándar en todos los contextos (por ejemplo, V para el potencial eléctrico, E para campo eléctrico, etc.) y las letras que denotan cantidades vectoriales siempre se anotan en cursiva o con flechas. b) Se dedica una atención significativa a los formatos con los que presentar argumentos o cálculos (por ejemplo, a la composición visual de una página con ecuaciones o instrucciones de programas informáticos). c) Los pasos realizados en un cálculo se documentan cuidadosamente para facilitar su comprensión para uno mismo y para otros, y para facilitar posteriores modificaciones. d) Se utilizan métodos especiales para impedir prejuicios y autoengaños (por ejemplo, instrumentos automáticos o experimentos de doble ciego). e) Se utilizan procedimientos sistemáticos para comprobar el trabajo realizado por otros científicos (por ejemplo, replicación de experimentos y múltiples revisiones de artículos enviados a revistas científicas).

Eficiencia

Ámbito cotidiano. La cognición humana está bien adaptada, por naturaleza, para el cumplimiento eficiente de tareas cotidianas que solo requieren un grado moderado de precisión y coherencia. En particular, suele ser posible realizar estas tareas con rapidez y sin esfuerzo mediante procesos de reconocimiento de pautas y conocimientos acumulados específicos de contextos.

Ámbito científico. En cambio, el trabajo científico suele requerir cadenas de inferencias largas y complejas. En consecuencia, prestar una atención más deliberada a la eficiencia cognitiva es importante por varias razones: a) La eficiencia llega a ser intrínsecamente más significativa para tareas largas (por ejemplo, un aumento en la eficiencia que conduzca a reducir el tiempo empleado a la mitad, es mucho más importante para una tarea que requiera meses que para otra que requiera minutos). b) las tareas complejas plantean exigencias que, sin una eficiencia adecuada, fácilmente pueden trascender las limitadas capacidades humanas de atención y velocidad de proceso. Ciertamente, si la eficiencia cognitiva es demasiado baja, la realización de tareas complejas puede llegar a ser totalmente imposible (por ejemplo, no podemos escribir un complejo programa informático en lenguaje ensamblador porque la enorme preocupación por los detalles de bajo nivel nos dejaría muy poca capacidad mental para atender a las tareas de diseño de alto nivel porque el tiempo necesario sobrepasaría cualquier límite práctico y porque el mantenimiento de la precisión llegaría a ser casi imposible).

De ahí que en la ciencia exista una gran necesidad de idear métodos de observación, de cálculo y de análisis de datos que sean eficientes y que permitan la realización de tareas complejas. Además, la eficiencia se debe evaluar mediante múltiples criterios y teniendo en cuenta las consecuencias a largo plazo. Por ejemplo, documentar y comprobar continuamente cálculos o programas informáticos es un proceso que requiere mucho tiempo; pero a la larga es eficiente porque permite ahorrar un tiempo que, en caso contrario, debería dedicarse a detectar y corregir errores, a esfor-

zarse por realizar modificaciones necesarias y a hacer que el trabajo sea comprensible para otras personas.

Implicaciones para el aprendizaje

Control de calidad. Los estudiantes, acostumbrados a los métodos informales de control de calidad utilizados en la vida de cada día, normalmente no aprecian lo propensos que son los seres humanos al error, especialmente cuando se enfrentan con tareas de precisión que requieren una corrección y una exactitud fiables. De manera similar, cuando cometen errores invocando principios inaplicables o elaborando erróneamente principios pertinentes, suelen considerar estos errores como simples descuidos. Por tanto, no ven muchas razones para examinarlos con cuidado con el fin de aprender de ellos y de evitar errores similares en el futuro.

Los estudiantes rara vez se plantean ellos mismos el objetivo explícito de idear métodos deliberados para prevenir y remediar errores. Como resultado, sus métodos de control de calidad casi nunca son sistemáticos. Además, sienten poca necesidad de implementar ni siquiera los métodos sencillos de prevención de errores que se les enseñan (por ejemplo, indicar unidades, distinguir los símbolos que denotan vectores de los que denotan números, etc.).

Eficiencia. No nos debe sorprender que los estudiantes importen criterios plausibles de eficiencia de la vida de cada día que, sin embargo, resultan ser ineficientes en tareas más complejas en las que se deben tener en cuenta consecuencias a más largo plazo. Siguen a continuación algunos ejemplos: a) Los estudiantes suelen escribir las soluciones a problemas sin preocuparse de su forma de presentación en la página y sin una justificación documentada de los pasos de la solución; además, se pueden hacer un lío cuando no pueden identificar información relevante. b) Normalmente se saltan los pasos intermedios de un cálculo (en ocasiones, más pasos de los que se saltaría un científico experto) y luego acaban con resultados erróneos o se pasan mucho tiempo buscando errores. c) Dedicar muy poco tiempo a describir un problema con cuidado antes de tratar de aplicar diversas ecuaciones, y luego se encallan o cometen errores porque no comprenden adecuadamente la situación del problema. d) Aprenden conceptos científicos que se les presentan por primera vez memorizando sus definiciones, pero consideran que es una pérdida de tiempo examinar sus implicaciones en varios casos especiales, y luego se encallan o confunden repetidamente cuando necesitan aplicar estos conceptos a diversos problemas.

Papel de la ciencia escolar

Realmente, la enseñanza de la ciencia en la escuela destaca la corrección y penaliza los errores que cometen los estudiantes en sus tareas o exámenes. Sin embargo, en este contexto los estudiantes normalmente consideran los errores principalmente como causas de embarazo o castigo y no como fuentes potenciales de aprendizaje. Además, rara vez se enseñan métodos sistemáticos para prevenir y corregir errores (salvo, quizá, en los cursos de informática donde, en ocasiones, se destacan métodos para depurar programas).

Los cursos de ciencias que se imparten en las escuelas tampoco suelen inculcar en los estudiantes una preocupación seria por la eficiencia cognitiva. Muchos ejercicios y problemas dados a los estudiantes son muy breves comparados con los problemas científicos reales y, en consecuencia, no destacan la necesidad de una eficiencia cognitiva. Además, empollar de cara a los exámenes (que con frecuencia dan gran valor a la velocidad) fomenta una preocupación por una eficiencia a muy corto plazo en vez de la eficiencia a más largo plazo que es importante en la ciencia.

CONCLUSIONES

Resumen

Como se ha discutido en las páginas precedentes, un funcionamiento efectivo en cualquier ámbito no solo requiere un conocimiento específico sobre el ámbito mismo sino también un conocimiento más general sobre los objetivos del ámbito y los medios cognitivos para alcanzarlos. En consecuencia, es interesante analizar y comparar los objetivos y la cognición de los ámbitos de la vida de cada día y de la ciencia. Hemos llevado a cabo este análisis, que se resume en las figuras 1 y 2, examinando y comparando los objetivos fundamentales de estos ámbitos y los objetivos subsidiarios de comprender y evaluar la validez. También hemos examinado y comparado la cognición en estos ámbitos: sus estructuras de conocimiento, los métodos para utilizar este conocimiento y las maneras de garantizar que esta utilización tenga calidad.

Nuestra discusión nos ha llevado a identificar unas dificultades generales de aprendizaje que cabe esperar cuando los estudiantes llegan al estudio de la ciencia procedentes del ámbito de la vida de cada día, y a destacar ejemplos de algunas dificultades comúnmente observadas. Muchas de estas dificultades se plantean porque los estudiantes no comprenden adecuadamente los objetivos de la ciencia ni los tipos de procesos cognitivos necesarios para abordar este ámbito desconocido. Por tanto, importan al ámbito científico objetivos o medios cognitivos que son adecuados para la vida diaria pero no lo son para la ciencia, o también pueden idear medios cognitivos inadecuados para la ciencia. Estas dificultades de aprendizaje pueden ser muy importantes porque tienen una influencia crucial en la manera en que los estudiantes abordan el proceso de aprender ciencia y centran su atención en él.

También se plantean complicaciones adicionales porque el conocimiento científico impartido en las escuelas difiere tanto de la ciencia real como de la vida de cada día, aunque comparte algunas características de cada ámbito. Como resultado, las dificultades de aprendizaje de los estudiantes son compuestas porque los verdaderos objetivos de la ciencia se pueden distorsionar y las maneras de pensar científicamente efectivas pueden enseñarse inadecuadamente.

INVESTIGACIONES PROPUESTAS

Salvo varios ejemplos ilustrativos, nuestra discusión ha sido principalmente teórica y ha sido concebida para dilucidar cuestiones importantes, para ofrecer un marco de referencia analítico y para indicar el camino hacia investigaciones futuras más detalladas. Los siguientes tipos de investigaciones serían de particular interés:

Investigaciones empíricas. a) Sería útil realizar entrevistas sistemáticas para identificar con más detalle las concepciones que los estudiantes tienen de los objetivos de la ciencia y de los procesos de pensamiento que consideren útiles para la ciencia. Por ejemplo, el trabajo de Songer y Linn (1991) es un paso en esta dirección e indica que los estudiantes que tienen una percepción más realista de la naturaleza de la ciencia también abordan mejor las materias científicas. b) Para ir más allá de los informes verbales de las concepciones de los estudiantes se podría observar la conducta real de los mismos. Sería, pues, interesante realizar observaciones comparativas de estudiantes individuales para discernir cómo abordan estos estudiantes tareas cognitivas como el aprendizaje de conceptos o la resolución de problemas, en los ámbitos científico y cotidiano. c) Por último, sería especialmente interesante, aunque quizá más difícil, llevar a cabo experimentos para investigar cómo afectarían a la conducta de aprendizaje de los estudiantes especificaciones más explícitas de objetivos de aprendizaje consonantes con objetivos científicos.

Transiciones entre otros tipos de ámbitos de conocimiento. Nuestro interés se ha centrado especialmente en el conocimiento cotidiano y en la ciencia natural. Sin embargo, nuestro análisis de distintos ámbitos de conocimiento ha sido totalmente general en la identificación de los tipos de objetivos y de medios cognitivos importantes en cualquier ámbito. Por tanto, sería revelador examinar y comparar de manera similar otros ámbitos de conocimiento (como los de las ciencias sociales, las leyes, la crítica literaria, etc.) para dilucidar algunas de sus características destacadas. Este examen también permitiría identificar probables dificultades de aprendizaje cuando los estudiantes llegan a uno de estos ámbitos procedentes de lo cotidiano o de algún otro ámbito (como, por ejemplo, cuando llegan al estudio de las ciencias sociales con una formación previa en ciencia natural).

Implicaciones para la enseñanza

Deficiencias educativas predominantes. Ya hemos indicado algunas de las deficiencias que predominan en la enseñanza de la ciencia en las escuelas. Esta enseñanza se refiere muy pocas veces a las clases de dificultades generales identificadas en las páginas precedentes y, además, las escuelas con frecuencia pueden transmitir nociones inadecuadas o engañosas sobre la naturaleza de la ciencia y los procesos de pensamiento necesarios para ella.

Fomentar la toma de conciencia de similitudes y diferencias. Un primer requisito previo para mejorar la educación es fomentar entre enseñantes, autores de libros de texto y estudiantes una conciencia más clara de las similitudes y diferencias entre los ámbitos de la ciencia y de la vida diaria.

Realmente existen similitudes apreciables porque es totalmente cierto que «la ciencia no es más que un refinamiento del pensamiento cotidiano». Por ejemplo, como se ha discutido en las páginas precedentes, tanto en la vida de cada día como en la ciencia las personas tratan de explicar y predecir fenómenos observables. Además, en los dos ámbitos estos objetivos se buscan explotando conocimientos consistentes en varios conceptos especiales, utilizando métodos adecuados para resolver problemas diversos y tratando de asegurar que la ejecución de la tarea tenga una calidad y una eficiencia adecuadas.

Pero también existen diferencias sustanciales porque varios siglos de desarrollo científico han producido refinamientos de importancia que van más allá de la vida de cada día. Ciertamente, tomar conciencia de estas diferencias es muy importante para realizar discriminaciones adecuadas y para evitar transferencias simplistas de maneras de pensar de la vida cotidiana a la ciencia o viceversa.

Entre los ejemplos de estas diferencias que han surgido de nuestra anterior discusión, podemos incluir los siguientes: a) Los objetivos científicos, cuyo fin es utilizar un mínimo de premisas para llegar a predicciones y explicaciones extensivas, son mucho más ambiciosos que los objetivos predictivos y explicativos de la vida de cada día. Por otra parte, la ciencia no trata directamente con valores humanos importantes para el objetivo fundamental cotidiano de llevar una buena vida. b) Los requisitos científicos de falta de ambigüedad, precisión, coherencia y generalidad son mucho más importantes que los normalmente necesarios en la vida cotidiana. Por tanto, los criterios de comprensión y validez deben ser más explícitos. c) En consecuencia, los medios cognitivos necesarios en la ciencia suelen ser más deliberados e implican conceptos definidos más explícitamente, estructuras de conocimiento más coherentes, métodos muy formales y simbólicos utilizados en conjunción con métodos no formales y una inquietud más elaborada por la calidad.

Con frecuencia los enseñantes no conocen suficientemente estas similitudes y diferencias ni las dificultades de aprendizaje para los estudiantes que se derivan de ellas. Su preocupación central por enseñar conocimientos científicos específicos suele dejar poco tiempo para reflexionar sobre cuestiones generales como las características

distintivas de la ciencia y de la vida de cada día. Además, los científicos inmersos en la investigación solo suelen ser conscientes de estas cuestiones tácitamente y, normalmente, no se sienten inclinados a articularlas explícitamente (o quizá ni siquiera sean capaces de hacerlo).

Una conciencia más explícita de estas cuestiones podría, al menos, ayudar a reducir algunos de los aspectos inadvertidamente indeseables de los métodos de enseñanza predominantes como, por ejemplo, un énfasis excesivo en conocimientos de datos y en manipulaciones formales.

Propuestas para la enseñanza. Una apreciación de las similitudes y las diferencias entre los ámbitos de la ciencia y de la vida de cada día sugiere un método de enseñanza orientado a reducir las dificultades de aprendizaje de los estudiantes. Este método identificaría específicamente aquellos aspectos de la vida cotidiana que son similares a los de la ciencia, con el objetivo de refinarlos sistemáticamente (con cuidadosas discriminaciones con el fin de evitar confusiones o reversiones hacia conocimientos cotidianos más primitivos). Por otra parte, este método también debería reconocer otros aspectos de la vida de cada día que no se pueden refinar fácilmente para indicar por qué son deficientes o inadecuados para la ciencia y para trascenderlos con concepciones científicas más útiles.

Siguen a continuación ejemplos de similitudes que se pueden explotar como bases para ese refinamiento. a) Algunos tipos de explicaciones y métodos utilizados en la vida de cada día son suficientemente similares a los de la ciencia como para ser elaborados de una manera más satisfactoria científicamente. (Por ejemplo, en muchos juegos, incluyendo el fútbol americano y el ajedrez, hace falta una planificación estratégica y abstracta). b) La precisión y la conducta basada en reglas no son completamente ajenas a la vida de cada día. (Por ejemplo, la precisión es esencial para marcar números de teléfono o hacer cuadrar las cuentas domésticas, y la conducta basada en reglas es común en el ajedrez y en otros juegos). La precisión y la conducta basada en reglas pueden ofrecer puntos de partida para la precisión y el pensamiento basado en reglas, de carácter mucho más profundo, que predominan en la ciencia. c) Como ya se ha indicado anteriormente, los métodos informales son tan importantes en la ciencia como en la vida de cada día. En consecuencia, pueden ser refinados apropiadamente para garantizar su coherencia con conocimientos científicos más formales y su empleo complementario con métodos formales.

Enseñanza explícita de conocimiento metacientífico. Por último, sería adecuado enseñar a los estudiantes de una manera más explícita los objetivos de la ciencia y los tipos de procesos de pensamiento útiles en este ámbito. La mejor manera de llevar a cabo esta enseñanza sería en el contexto de verdaderos cursos de ciencia porque ello produciría beneficios mutuos: a) Facilitaría el aprendizaje de métodos y principios específicamente científicos, porque los argumentos y las maneras de pensar de la ciencia suelen carecer de motivos y de sentido para los estudiantes que no tienen una apreciación adecuada de los objetivos científicos. b) A la inversa, una discusión de los objetivos y los procesos de pensamiento de la ciencia solo tendría sentido para los estudiantes si se ilustraran repetidamente en el contexto de problemas y materias de carácter específicamente científico.

Es evidente que una enseñanza dirigida a hacer que los estudiantes sean más claramente conscientes de los objetivos y los procesos de pensamiento de la ciencia constituiría un reto de importancia. Exigiría un esfuerzo a largo plazo (que probablemente abarcaría varios cursos de ciencias) en el que la enseñanza de conocimientos científicos específicos estuviera incluida en una comprensión más amplia de los objetivos y los métodos científicos y en el que el trabajo diario con principios y problemas científicos ayude a ilustrar constantemente los objetivos y las maneras de pensar de la ciencia. Este esfuerzo de enseñanza sería ambicioso y difícil de llevar a la práctica. Sin embargo, sin este tipo de esfuerzos es probable que los estudiantes solo adquieran conocimientos científicos meramente superficiales, sin una comprensión adecuada de su cometido y sin mucha capacidad para utilizarlos con eficacia.

Notas

El metacognocimiento de los objetivos y la cognición de un ámbito es distinto del conocimiento metacognitivo que un individuo tiene de sus propios procesos cognitivos.

Referencias

- BERNSTEIN, J. (3 de diciembre de 1979). Master of the trade. *The New Yorker*, p. 84.
- BRIDGMAN, P. W. (1955). *Reflections of a physicist* (2ª ed.). Nueva York: Philosophical Library.
- CARAMAZZA, A.; MCCLOSKEY, M., y GREEN B. (1981). Naive beliefs in «sophisticated» subjects: Misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9, 117-123.
- CARPENTER, T. P.; LINDQUIST, M. M.; MATTHEWS, W., y SILVER, E. A. (1983). Results of the third NAEP mathematics assessment: Secondary school. *Mathematics Teacher*, 76 (9), 652-659.
- CHI, M. T. H.; FELTOVICH, P. J., y GLASER, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- CHI, M. T. H.; GLASER, R., y REES, E. (1981). Expertise in problem solving. In R. Sternberg (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence* (Vol. 1). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- CLEMENT, J. (1982). Students' preconceptions in elementary mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- COHEN, R.; EYLON, B., y GANIEL, U. (1983). Potential difference and current in simple circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51, 407-412.
- DISSA, A. (1982). Unlearning Aristotelian physics: A study of knowledge-based learning. *Cognitive Science*, 6, 37-75.
- DISSA, A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. En D. Gentner y A. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 15-33). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- DISSA, A. (1988). Knowledge in pieces. En G. Forman y P.B. Pufall (Eds.), *Constructivism in the computer age* (pp. 49-70). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- DRIVER, R.; GUESNE, E., y TIBERGHEN, A. (Eds.) (1985). *Children's ideas about the physical world*. Great Britain: Open University Press.
- EINSTEIN, A. (1954). *Ideas and opinions*. Nueva York: Crown.
- EYLON, B., y REIF, F. (1984). Effects organization on task performance. *Cognition and Instruction*, 1, 5-44.
- FEYNMAN, R. P. (1966, August). The development of the space-time view of quantum electrodynamics. *Physics Today*, 19, 31-44.
- GUNSTONE, R. F. (1987). Student understanding in mechanics: A large population survey. *American Journal of Physics*, 55, 691-696.
- HADAMARD, J. (1945). *The psychology of invention in the mathematical field*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- HALLOUN, I. A., y HESTENES, D. (1985a). The initial knowledge state of college students. *American Journal of Physics*, 53, 1.043-1.055.
- HALLOUN, I. A., y HESTENES, D. (1985b). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53, 1.056-1.065.
- HELLER, J. I., y REIF, F. (1984). Prescribing effective human problem-solving processes: Problem description in physics. *Cognition and Instruction*, 1, 177-216.
- HELM, H., y NOVAK, J. D. (Eds.) (1983). *Proceedings of the international seminar on misconceptions in science and mathematics*. Ithaca, NY: Cornell University.
- HOLTON, G. (1988). *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein* (edición revisada). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- JACOB, F. (1988). *The statue within: An autobiography*. Nueva York: Basic Books.
- JOHNSON-LAIRD, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- KLAHR, D. (1987). Goal formation, planning, and learning by pre-school problem solvers, or 'My socks are in the dryer'. En R.S. Siegler (Ed.), *Children's thinking: What develops?* (pp. 181-212). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- LABUDDE, P., REIF, F., y QUINN, L. (1988). Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis. *International Journal of Science Education*, 10, 81-98.
- LARKIN, J. (1981). Cognition of learning physics. *American Journal of Physics*, 49, 1-30.
- LARKIN, J. H. (1989). Display-based problem solving. En D. Klahr y K. Korovsky (Eds.), *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon* (pp. 319-341). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- LARKIN, J. H.; McDERMOTT, J.; SIMON, D. P., y SIMON, H. A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208, 1.335-1.342.
- MCCLOSKEY, M.; CARAMAZZA, A., y GREEN, B. (1980). Curvilinear motion in the absence of external forces: Naive beliefs about the motion of objects. *Science*, 210, 1.139-1.141.

- MCDERMOTT, L. C. (julio 1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 37, 24-32.
- METZ, K.E. (1991). Development of explanation: Incremental and fundamental change in children's physics knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 785-797.
- OHANIAN, H. C. (1985). *Physics*. Nueva York: W.W. Norton.
- PAIGE, J. M., y SIMON, H. A. (1966). Cognitive processes in solving algebra word problems. Reproducido en H.A. Simon (1979), *Models of thought*. New Haven, CT: Yale University Press.
- REIF, F. (1983). Understanding and teaching problem solving in physics. En *Research on physics education: Proceedings of the first international workshop* (pp. 15-53). Paris, France: Centre National de la Recherche Scientifique.
- REIF, F. (1987a). Interpretation of scientific or mathematical concepts: Cognitive issues and instructional implications. *Cognitive Science*, 11, 395-416.
- REIF, F. (1987b). Instructional design, cognition, and technology: Applications to the teaching of scientific concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 309-324.
- REIF, F., y ALLEN, S. (en prensa). Cognition for interpreting scientific concepts: A study of «acceleration.» *Cognition and Instruction*.
- ROSCH, E. (1978). Principles of categorization. En E. Rosch y B.B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 27-48). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- SCHOENFELD, A. H. (1983). Beyond the purely cognitive: Belief systems, social cognitions, and metacognitions as driving forces in intellectual performance. *Cognitive Science*, 7, 329-363.
- SCHOENFELD, A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. Orlando, FL: Academic Press.
- SCHOENFELD, A. H. (1987). What's all the fuss about metacognition? En A.H. Schoenfeld (Ed.), *Cognitive science and mathematics education*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- SCHWINGER, J. (1989, February). A path to quantum electrodynamics. *Physics Today*, 42, 42-48.
- SIMON, H. A. (1981). *The sciences of the artificial* (2ª ed.). Cambridge, MA: MIT Press.
- SMITH, E. E., y MEDIN, D. L. (1981). *Categories and concepts*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- SONGER, N. B. y LINN, M. C. (1991). How do students' views of science influence knowledge integration? *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 761-784.
- TROWBRIDGE, D. E., y MCDERMOTT, L. C. (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, 48, 1.020-1.028.
- TROWBRIDGE, D. E., y MCDERMOTT, L. C. (1981). Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension. *American Journal of Physics*, 49, 242-253.
- TUFTE, E. R. (1983). *The visual display of quantitative information*. Santa Monica, CA: Graphics Press.
- TUFTE, E. R. (1990). *Envisioning information*, Cheshire, CT: Graphics Press.
- VIENNOT, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Science Education*, 1, 205-221.
- WHITE, B. Y. (1983). Sources of difficulty in understanding Newtonian mechanics. *Cognitive Science*, 7, 41-65.

El conocimiento científico y el cotidiano: comparación e implicaciones para el aprendizaje

Frederick Reif y Jill H. Larkin

CL&E, 1994, 21, pp. 3-30

Resumen: Un análisis y una comparación de la vida diaria y el ámbito de la ciencia revela diferencias significativas en sus objetivos y en los medios cognitivos utilizados para alcanzar esos objetivos. La falta de conciencia que los estudiantes tienen de estas diferencias puede conducir a una dificultad general de aprendizaje en su estudio de la ciencia. Por tanto, muchos estudiantes a) tienen conceptos erróneos de objetivos científicos, b) importan objetivos y maneras de pensar que son eficaces en la vida de cada día pero que no son adecuados para la ciencia, y c) idean maneras de pensar inadecuadas para la ciencia. Se plantean complicaciones adicionales porque la ciencia que se enseña en las escuelas suele diferir tanto de la ciencia real como de la vida de cada día. De esta manera, las dificultades de aprendizaje de los estudiantes aumentan porque los objetivos científicos se distorsionan y las maneras científicas de pensar se enseñan de manera inadecuada. El análisis precedente sugiere algunas investigaciones empíricas y algunas mejoras educativas.

Artículo original: Cognition in Scientific and Every day Domains: Comparison and Learning Implications. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 28, N.º 9, pp. 733-760 (1991). Reproducido con autorización de la National Association for Research in Science Teaching. Traducción de Genis Sánchez.

Dirección: Frederick Reif. Center for Design of Educational Computing y Departamentos de Física y Psicología, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania 15213. Jill H. Larkin. Departamentos de Física y Psicología y Center for Design of Educational Computing, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania 15213.

Agradecimientos: El segundo autor desea agradecer el apoyo recibido de la James S. McDonnell Foundation Program in Cognitive Studies for Educational Practice. Actualmente la autora trabaja en el diseño y desarrollo curricular en el ámbito del desarrollo socio-personal y moral desde una perspectiva socio-constructivista. Recientemente está ampliando su campo de interés al papel de la Televisión como mediador semiótico en la construcción del mundo social.

© PERMISOS PARA CITAR O REPRODUCIR EN OTRAS FUENTES: Se pueden citar libremente hasta 500 palabras. Para reproducir una porción de texto mayor, figuras o ilustraciones, se deberá pedir permiso por escrito a la revista, especificando el uso al que se destina el texto. En todos los casos, se deberá citar el copyright de *CL&E*. En el caso de artículos o textos que hayan sido a su vez reproducidos en *CL&E* los interesados deberán dirigirse tanto a los detentadores del copyright original como a *CL&E*, en el caso de que se quiera hacer uso de la traducción. FOTOCOPIAS: Para todo lo relacionado con el uso mediante fotocopia del material de esta revista, deberán dirigirse a: CEDRO, C/ José Maraón, 10, 3.º Izda. Tel. 594 15 75. Fax 445 35 67

No, no puedo aceptar
más investigadores en
clase, porque los alumnos
ya no me ríen los chistes

