



¿Qué hemos aprendido sobre el razonamiento de los estudiantes de química?

What have we learned about student reasoning in chemistry?

Vicente Talanquer¹

Resumen

En este trabajo se resumen los resultados de investigaciones en ciencias cognitivas, educación de las ciencias y didácticas disciplinarias específicas sobre el razonamiento humano que proporcionan información relevante para el aprendizaje de la química, y se resaltan sus implicaciones para el currículum, la enseñanza y la evaluación en la disciplina. En el ensayo se describen y analizan diversas perspectivas cognitivas sobre la naturaleza del conocimiento de los estudiantes y su impacto sobre el razonamiento y el aprendizaje.

Palabras clave

Aprendizaje, Cognición, Conocimiento, Enseñanza, Razonamiento.

Abstract

This work summarizes the results of research in cognitive science, science education, and discipline-based education on human reasoning that provide relevant information for chemistry education, with implications for curriculum, instruction, and assessment in the discipline. This essay describes and analyzes various cognitive perspectives on the nature of student knowledge and its impact on thinking and learning.

Keywords

Cognition, Knowledge, Learning, Reasoning, Teaching.

¹ Departamento de Química y Bioquímica, Universidad de Arizona, Tucson.

Introducción

Los resultados de investigaciones en ciencias cognitivas, educación de las ciencias y didáctica específica de las distintas ciencias en los últimos 60 años nos han ayudado a comprender muchas de las dificultades que los estudiantes enfrentan para pensar y razonar con y sobre conceptos e ideas centrales en química (Amin & Levrini, 2017; Lederman et al., 2023; National Research Council, 2000; Vosniadou, 2013). Estos trabajos también delinear pedagogías y estrategias de enseñanza que facilitan el desarrollo de aprendizajes significativos de manera progresiva. En esta contribución se seleccionan y analizan resultados de investigaciones sobre la naturaleza del conocimiento de los estudiantes y sus formas de razonar que son relevantes para el aprendizaje de la química, y se resaltan sus implicaciones para el currículum, la enseñanza y la evaluación en la disciplina. El objetivo es contribuir a reducir la brecha entre los resultados de la investigación educativa y su aplicación en las aulas de química, haciendo explícitas las recomendaciones didácticas que emanan de diferentes perspectivas en el análisis del conocimiento y formas de razonar de los estudiantes.

Perspectivas de dominio general

Las concepciones modernas sobre el razonamiento y el aprendizaje de los estudiantes han sido fuertemente influenciadas por ideas sobre funcionamiento y desarrollo cognitivo introducidas por Jean Piaget en los años 1920 y 1930 (Beilin, 1992). Aunque su propuesta de desarrollo cognitivo a través de etapas bien definidas (sensorial-motora, preoperacional, operacional concreta, operacional formal) ha sido fuertemente criticada, su reconocimiento del papel crítico que los conocimientos previos juegan en el razonamiento humano se sostiene como eje central de las teorías cognitivas modernas sobre el aprendizaje. De acuerdo con esta perspectiva constructivista, el conocimiento humano se organiza en patrones mentales o esquemas cognitivos innatos o aprendidos. Estos esquemas nos permiten identificar y darle sentido a objetos y eventos a nuestro alrededor, pues nuestra mente procesa toda información o experiencia con base en estos patrones mentales preestablecidos (por ejemplo, si vemos un animal de tamaño mediano con cuatro patas que ladra, lo reconoceremos como un perro con base en un esquema mental previo). Este proceso recibe el nombre de “asimilación”. Cuando enfrentamos un objeto o situación novedosa, los esquemas previos pueden modificarse y dar lugar a nuevos esquemas a través de un proceso conocido como “acomodación” (por ejemplo, un niño que ve un caballo por primera vez lo puede clasificar como perro hasta que desarrolla un nuevo esquema para animales de cuatro patas que relinchan en lugar de ladrar).

Desde la perspectiva constructivista piagetiana, las personas construyen conocimientos de manera continua con base en sus conocimientos previos y sus interacciones con el mundo que los rodea. Estas ideas han sido aplicadas por diversos investigadores en educación química para proponer estrategias de enseñanza de resolución de problemas numéricos y conceptuales en química. Muchos de los problemas y preguntas que les planteamos a los estudiantes en nuestras clases de química requieren la aplicación de esquemas de razonamiento formal (por ejemplo, razonamiento proporcional) que muchos estudiantes no han desarrollado completamente (Herron, 1975). Es por lo que se recomienda *analizar la demanda cognitiva de problemas numéricos y proporcionar*

andamiajes que ayuden a los estudiantes a identificar formas de razonar productivas. Otros autores han caracterizado y analizado diversos tipos de conocimientos previos que afectan la comprensión de conceptos e ideas en química (Kind, 2004; Taber, 2002), enfatizando la importancia de hacer visible el conocimiento de los estudiantes a través de evaluaciones formativas diagnósticas para guiar la planeación e implementación de actividades de aprendizaje. De acuerdo con Piaget, el aprendizaje requiere interacción del aprendiz con sus alrededores, de lo que se desprende la importancia de involucrar a los estudiantes de manera activa e interactiva en situaciones de aprendizaje que demanden el análisis de ideas y conceptos centrales en la disciplina (Bunce, 2001).

Nuestras ideas sobre el razonamiento de los estudiantes en química también han sido influenciadas por la teoría general de procesamiento de la información (TPI) desarrollada en los años 1960 (Malmberg et al., 2019). En esta teoría, la mente se conceptualiza como una computadora que captura información del ambiente (memoria sensorial), la procesa en tiempo real (memoria de corto plazo o de trabajo) y la almacena para su uso futuro (memoria de largo plazo). La TPI propone que la mente humana trabaja en secuencia, recibiendo información a través de los sentidos, procesándola en la memoria de trabajo e integrándola con conocimientos previos almacenados en la memoria de largo plazo. La memoria de trabajo tiene capacidad para procesar un número limitado de unidades de información (7 ± 2) en un tiempo limitado, lo que impone restricciones en el razonamiento. Sin embargo, la memoria de largo plazo puede almacenar grandes cantidades de información por largo tiempo, particularmente cuando el conocimiento almacenado está bien integrado.

La TPI ha sido utilizada por diversos educadores en química para analizar las dificultades que los estudiantes enfrentan para resolver problemas numéricos. Por ejemplo, Alex Johnstone (2006) desarrolló un modelo de resolución de problemas que predice que un estudiante es más exitoso cuando el problema a resolver tiene una demanda cognitiva igual o menor a la capacidad de su memoria de trabajo. En este modelo, la demanda cognitiva de un problema se estima con base en el número de pasos requeridos para resolverlo. Las limitaciones impuestas por la capacidad de procesamiento de la memoria de trabajo, se reducen cuando los docentes *dan instrucciones simples y directas, reducen la complejidad lingüística de las preguntas, dividen el problema en varias partes, o proporcionan apoyos cognitivos* (por ejemplo, presentan la solución detallada de problemas similares) (Gabel & Bunce, 1994). Los docentes también pueden *promover el uso de estrategias de estudio que facilitan el procesamiento y recuperación de información de la memoria de largo plazo, como la elaboración de resúmenes o mapas conceptuales, el estudio espaciado, y la generación de explicaciones* (Brown et al., 2014; Hartman et al., 2022). Estas estrategias ayudan a expandir, organizar y conectar unidades de conocimiento en la memoria de largo plazo, creando estructuras de conocimiento más grandes e integradas. *La elaboración y uso de representaciones visuales (dibujos, gráficas, diagramas) de los sistemas de interés también facilita el procesamiento cognitivo a través de la construcción de modelos mentales en la memoria de trabajo que ayudan a conectar y procesar la información* (Bodner & Domin, 2000).

Perspectivas de dominio específico

Las perspectivas sobre cognición humana resumidas en la sección anterior son de dominio general, pues son independientes del contenido a aprender. A comienzos de los años 1970, los investigadores comenzaron a prestar más atención a la naturaleza específica

del conocimiento previo de los estudiantes en diferentes áreas y a sus efectos sobre el razonamiento y el aprendizaje (Driver & Easley, 1978). Estos estudios mostraron que las ideas expresadas por estudiantes novatos en ciertos temas diferían de manera significativa de las aceptadas por los expertos, dificultando el aprendizaje (Driver et al., 1994). Por ejemplo, los estudiantes novatos de química frecuentemente consideran que las burbujas que se forman en el agua hirviendo contienen hidrógeno y oxígeno, en lugar de vapor de agua, y qué energía se libera cuando los enlaces químicos se rompen, en lugar de cuando se forman (Kind, 2004; Taber, 2002). Este tipo de ideas “no-normativas” se conocen como concepciones alternativas y aunque hay consenso en que los estudiantes las construyen con base en conocimientos previos, ha habido considerable debate sobre la naturaleza y estructura de este conocimiento.

Los desacuerdos entre investigadores sobre la naturaleza del conocimiento previo de los estudiantes comúnmente se describen presentando dos perspectivas contrastantes. Por un lado, en la llamada perspectiva del “conocimiento-en-teorías” se asume que los humanos desarrollan teorías implícitas intuitivas sobre las propiedades y el comportamiento de las entidades y fenómenos a su alrededor a través de sus experiencias e interacciones diarias en el mundo (Gopnik & Wellman, 1994). En esta perspectiva, este conocimiento implícito e intuitivo está altamente organizado e interconectado y guía nuestro razonamiento cuando nos enfrentamos con objetos o situaciones novedosas. Algunas de esta teoría intuitivas son inconsistentes con el conocimiento científico normativo y llevan a las personas a expresar concepciones alternativas. Estas concepciones pueden ser difíciles de cambiar o eliminar, pues esto demanda un gran cambio en la estructura conceptual (esto es, la construcción y adopción de otra teoría), lo que ocurre con mayor probabilidad cuando los estudiantes están descontentos con sus ideas y consideran que las ideas científicas que se les presentan son plausibles, comprensibles y productivas (Posner et al., 1982).

Por otro lado, en la perspectiva del “conocimiento-en-fragmentos” se considera que el conocimiento que adquirimos a través de la experiencia es fragmentado y está constituido por muchas piezas (diSessa, 1993). Algunos de estos fragmentos, a los que se les denomina fenomenológicos primitivos o “p-prims”, son pequeñas unidades de conocimiento implícito abstraídas de la experiencia (por ejemplo, entre mayor el esfuerzo mayor el efecto, entre mayor la resistencia menor el efecto) y se aplican en el análisis de diversos fenómenos. Se trata de piezas de conocimiento relativamente independientes cuya activación depende del contexto y la naturaleza del problema a enfrentar. Desde esta perspectiva, las concepciones alternativas expresadas por los estudiantes no son el resultado de teorías implícitas intuitivas, sino que resultan de la activación de piezas de conocimiento que no son útiles en un determinado contexto. Por ejemplo, un estudiante de química novato puede indicar que entre mayor sea la masa molecular de una sustancia mayor será su punto de ebullición no con base en una teoría alternativa sobre la ebullición de líquidos, sino simplemente por la aplicación errónea del p-prim “los objetos pesados ofrecen mayor resistencia” lo cual no es una concepción alternativa dado que esta idea puede ser productiva en otras situaciones.

Estas dos perspectivas contrastantes sobre la naturaleza del conocimiento previo de los estudiantes tienen implicaciones distintas para la enseñanza de la química (Amin et al., 2014). Las dos resaltan *la importancia de involucrar a los estudiantes en actividades que hagan visibles sus ideas iniciales sobre los sistemas y fenómenos a analizar*. Sin embargo, sugieren estrategias de enseñanza distintas. La perspectiva del “conocimiento-en-teorías”

propone que los docentes deben *inducir conflicto cognitivo enfrentando a los estudiantes con eventos discrepantes que los lleven a cuestionarse sus teorías implícitas, intuitivas y a reconocer las ventajas de las ideas científicas que se les presentan* (Niaz, 1995). Por otro lado, la perspectiva del “conocimiento-en-fragmentos” sugiere que en lugar de buscar reemplazar teorías, los docentes deben *sacar ventaja de los conocimientos previos de los estudiantes e involucrarlos en actividades que los ayuden a progresivamente expandir e integrar sus conocimientos y reconocer en que contextos son útiles* (Taber & García-Franco, 2010). En lugar de reemplazar, se busca transformar ideas para ayudar a los estudiantes a reconocer cuándo y cómo aplicar sus conocimientos. Como veremos en la siguiente sección, ambas estrategias (reemplazo o transformación) pueden ser útiles dependiendo de los temas a aprender y de los estudiantes con los que se trabaja.

Aunque es común caracterizar el conocimiento previo de los estudiantes utilizando las perspectivas contrastantes antes descritas, esta caracterización es limitada, pues no reconoce el trabajo y perspectivas de investigadores que han propuesto otros modelos sobre la naturaleza del conocimiento previo a lo largo del continuo de más coherente a más fragmentado. Por ejemplo, algunos investigadores han propuesto que el conocimiento de los estudiantes en ciertas áreas está moderadamente organizado en “teorías de marco” que no tienen el nivel de consistencia y sistematicidad de las teorías científicas, pero sirven como guías del razonamiento (Vosniadou, 2013; 2019). Estos marcos de referencia están conformados por suposiciones intuitivas sobre la naturaleza de los objetos y procesos que se analizan (suposiciones ontológicas) y por compromisos implícitos sobre cómo se conoce y cómo se aprende (compromisos epistemológicos).

De acuerdo con la perspectiva de “teorías de marco”, el *desarrollo de conocimientos centrales en una disciplina lleva tiempo y debe orquestarse siguiendo progresiones de aprendizaje que ayudan a los estudiantes a identificar las suposiciones ontológicas y compromisos epistemológicos de las teorías científicas* (Duschl et al., 2011). Por ejemplo, se sabe que el razonamiento de muchos estudiantes novatos sobre los procesos químicos está comúnmente guiado por un marco de referencia de “causalidad centralizada” en el que los cambios se atribuyen a la acción de un agente activo con intenciones, deseos o metas específicos (por ejemplo, minimizar su energía, ganar un octeto de electrones de valencia) (Taber, 1998; Talanquer, 2006). En este marco, los procesos generalmente se consideran como secuenciales, lineales, unidireccionales y determinísticos (Grotzer, 2012). Sin embargo, los procesos químicos son emergentes, descentralizados, no lineales y probabilísticos (Talanquer, 2015). El desarrollo de aprendizajes significativos en esta área requiere de la planeación cuidadosa de secuencias de instrucción que ayuden a los estudiantes a reconocer las diferencias entre estos dos modelos de causalidad y creen múltiples oportunidades para que los estudiantes apliquen el modelo científico en contextos diversos y progresivamente más complejos.

Otros investigadores han propuesto que el conocimiento humano se organiza en una gran variedad de estructuras relativamente estables que sirven funciones estructurales y de control y determinan el tipo y número de otros recursos cognitivos que serán activados para completar una actividad y cómo se usan (Andersson, 1986; Brown, 2014; Gordon & Tannen, 2023; Talanquer, 2006, 2015). De manera general, estos elementos estructurales toman la forma de esquemas de conocimiento o enmarques de actividad. Los esquemas de conocimiento afectan las suposiciones y expectativas del individuo sobre las propiedades y

el comportamiento de los componentes del sistema o procesos bajo análisis. Los enmarques de actividad afectan el posicionamiento del individuo con respecto a la tarea, su uso de los recursos activados y las acciones que implementa. Por ejemplo, cuando un estudiante de química busca explicar por qué se enfría un objeto caliente al ponerlo sobre una mesa, el contexto puede llevarlo a enmarcar el fenómeno como un “evento de pérdida” y a activar un esquema de conocimiento sobre “sustancias contenidas” (Sanmarti et al., 1995). En consecuencia, el estudiante puede explicar el fenómeno indicando que el objeto caliente pierde calor que escapa a los alrededores. En esta perspectiva, las concepciones alternativas de los estudiantes se consideran construcciones temporales creadas en el momento con base en los esquemas y enmarques que se activan en un contexto determinado.

La perspectiva del conocimiento previo organizado en esquemas y enmarques sugiere que estos elementos estructurales se refuerzan de manera constante a través de la experiencia y se activan de manera automática. Por tanto, los estudiantes requerirán de *considerable apoyo y guía para construir elementos estructurales alternativos alineados con modelos y teorías normativas en la disciplina, así como práctica extensa para aprender a reconocer los contextos en que resulta útil activarlos* (Linn, 2005). Por ejemplo, los estudiantes novatos de química frecuentemente aplican un esquema “aditivo” al hacer predicciones sobre las propiedades de compuestos químicos (Talanquer, 2008). En este esquema se asume que las propiedades de un compuesto resultan del promedio ponderado de los elementos que los componen (por ejemplo, el compuesto $\text{AgCl}(s)$ se predice maleable como la plata). Las investigaciones en esta área indican que los estudiantes requieren de práctica extensa y reflexiva para desarrollar el esquema normativo en el que las propiedades del compuesto se reconocen como emergentes de las interacciones entre sus componentes a nivel submicroscópico.

Las diversas perspectivas descritas en esta sección sobre el conocimiento previo de los estudiantes apuntan a la existencia de una gran variedad de estructuras cognitivas, desde más simples a más complejas, de menos a más coherentes e integradas, que guían, pero también constriñen el razonamiento y el aprendizaje. El análisis de las investigaciones en ciencias cognitivas y educación de las ciencias en años recientes sugiere que estas distintas perspectivas están convergiendo en una visión sistémica sobre el funcionamiento de la mente humana (Amin & Levrini, 2017; Barsalou, 2020; Brown & Hammer, 2008) la cual se describe a continuación.

Perspectiva de sistemas complejos

Desde la perspectiva sistémica, el aprendizaje de la química, o cualquier otra disciplina, involucra la formación gradual de múltiples redes conceptuales dinámicas interconectadas. Estas estructuras dinámicas integran información multimodal (visual, auditiva, táctil, motora, lingüística, emocional) adquirida a través de nuestras experiencias sensoriomotoras e interacciones sociales (Barsalou, 2020). Cuando un individuo enfrenta un problema o situación, la información que se percibe activa diversas estructuras que se utilizan para generar una conceptualización dinámica del evento. Esta conceptualización ayuda a la persona a categorizar la situación, explicarla y tomar acciones para alcanzar una meta. Si los resultados de estas acciones se consideran satisfactorios y suficientes para resolver el problema, es probable que la conceptualización generada se almacene en la memoria de largo plazo para reusarla en el futuro. Si los resultados son insatisfactorios, es probable que la conceptualización se descarte o modifique de manera dinámica en la búsqueda de mejores

alternativas (Brown, 2014). Se dice que estas conceptualizaciones están “situadas” en el contexto específico en el que se trabaja y pueden ser altamente idiosincráticas, inestables y sujetas a cambio en la medida que el individuo recibe más información, interacciona con su alrededor u otras personas, recuerda otras ideas o reflexiona sobre el problema que se enfrenta.

Esta perspectiva sistémica asume la coexistencia de diversas estructuras cognitivas dinámicas más o menos coherentes e integradas. Las características de estas estructuras dependerán de las experiencias pasadas del individuo y de su nivel de competencia en un área determinada. Algunas de estas estructuras pueden ser bastante complejas (como teorías) mientras otras pueden ser fragmentos de conocimientos (como p-prims). Algunas pueden ser muy estables y resistentes al cambio, mientras otras pueden ser variables y evolucionar rápidamente. Conceptualizaciones distintas sobre el mismo objeto o fenómeno pueden coexistir en la mente de un individuo y ser activadas en diferentes situaciones. Las investigaciones demuestran que aun los expertos tienen concepciones alternativas que compiten con concepciones científicas sobre un mismo fenómeno, pero han desarrollado la capacidad de inhibir su activación en ciertos contextos (Potvin, 2017). Esto sugiere que no hay una sola estrategia de enseñanza que permita promover el aprendizaje significativo en todos los temas. *Las estrategias deben adaptarse con base en el conocimiento previo de los estudiantes, el cual debe diagnosticarse y monitorearse de manera continua por medio de evaluaciones formativas.*

Las estructuras dinámicas complejas que se activan en la mente cuando enfrentamos una situación sostienen y guían diversos procesos cognitivos, como la categorización y la toma de decisiones. Un concepto puede caracterizarse como una red coherente de elementos dinámicamente interconectados formando un esquema que facilita la predicción de propiedades y comportamientos por medio de la clasificación. Por ejemplo, ejemplo, si clasificamos un objeto como una naranja, le atribuiremos propiedades como sólido, redondo, comestible y dulce. Las categorías a las que asignamos los elementos de una situación tienen un impacto crítico sobre cómo razonamos sobre ellos. Varios estudios han demostrado que el aprendizaje de conceptos científicos es particularmente difícil cuando requiere recategorizar elementos intuitivamente asignados a una categoría distinta a la normativa (Chi, 2013). Por ejemplo, muchos estudiantes novatos conceptualizan el calor como una sustancia en lugar de como un proceso, o consideran que la fuerza es una propiedad de un objeto en lugar de una interacción entre objetos. Realizar esta recategorización no es fácil, sobre todo cuando la categoría normativa ni siquiera existe en la mente de los estudiantes. Este es el caso cuando los estudiantes deben reconceptualizar las propiedades y procesos químicos como emergentes en lugar de como aditivos y centralizados (Tümay, 2016).

Los docentes pueden ayudar a los estudiantes a enfrentar los retos de razonamiento y aprendizaje provocados por categorizaciones incorrectas, *ayudándolos a reconocer o construir categorías alternativas, contrastarlas con las que se activan de manera intuitiva y usarlas para reanalizar las propiedades o fenómenos bajo análisis* (Slotta & Chi, 2006). Por ejemplo, para ayudar a los estudiantes a conceptualizar el calor como un proceso de intercambio de energía en lugar de como una sustancia, resulta productivo explorar sus ideas sobre cómo se transfiere la energía, enriquecer estas ideas usando actividades de modelación y crear oportunidades para que comparen y contrasten modelos distintos de transferencia energética (Amin et al., 2014).

Las distintas estructuras cognitivas que dinámicamente se forman en la mente cuando interaccionamos con un objeto o situación involucran asociaciones mentales entre múltiples elementos. Estas asociaciones facilitan la realización de inferencias y la toma de decisiones por medio del razonamiento heurístico (Morewedge & Kahneman, 2010). Esta forma de razonamiento es frecuentemente activada por las señales explícitas que percibimos a través de los sentidos (por ejemplo, el tamaño, color, rapidez o forma de los objetos) (Oppenheimer, 2008). El reconocimiento de elementos situacionales con base en experiencias pasadas o su similitud con otros elementos conocidos influye fuertemente sobre las inferencias que se hacen y las decisiones que se toman (Talanquer, 2014). Por ejemplo, si le pedimos a un estudiante de química novato que prediga cuál de dos sustancias es más soluble en agua y una se ve como sal de mesa, es muy probable que seleccione esta sustancia usando un heurístico de similitud, descartando el análisis de su composición química (Maeyer & Talanquer, 2010).

Los expertos en una disciplina también utilizan el razonamiento heurístico para realizar inferencias y tomar decisiones. Sin embargo, el conocimiento especializado que poseen les permite reconocer de manera automática las señales apropiadas para razonar sobre el problema (Kahneman & Klein, 2009). Por ejemplo, un experto que ve un frasco con la etiqueta KCl(s) reconoce de manera automática señales implícitas (combinación de elementos metálicos y no metálicos) que le permiten inferir que se trata de un compuesto iónico y predecir que será soluble en agua. Esto indica que, independientemente del nivel de conocimientos o experiencia, las personas generan respuestas iniciales a los problemas que enfrentan con base en las estructuras cognitivas que se activan de manera automática y reducen el esfuerzo cognitivo. Es por ello que es importante *ayudar a los estudiantes a construir redes de conocimiento organizadas de acuerdo a marcos científicos que puedan activar de manera automática* (Linn, 2005). La construcción de estas redes se facilita involucrando a los estudiantes en actividades de modelación donde se utilizan herramientas que permiten que los estudiantes elaboren diversas representaciones visuales de los sistemas y procesos de interés y las utilicen para generar explicaciones mecánicas (Windschitl et al., 2008) Estas explicaciones deben capturar y hacer explícitas las entidades responsables de los fenómenos, sus propiedades e interacciones, las actividades en las que participan y su organización en el tiempo y espacio (Russ et al., 2008).

El desarrollo de redes conceptuales bien integradas requiere de tiempo, trabajo activo y repetido con conceptos e ideas centrales en la disciplina, práctica escalonada y reflexiva, retroalimentación formativa y evaluaciones que enfatizan la comprensión de ideas. Cursos en los que se cubre gran cantidad de contenido de manera superficial y en los que se transmite la información de manera pasiva no crean las condiciones necesarias para que esto suceda. Pero buscar el desarrollo de un conocimiento sólido e integrado no es suficiente si el ambiente de aprendizaje no es motivador y no promueve la reflexión. El aprendizaje significativo demanda un nivel de esfuerzo cognitivo que difícilmente se invertirá en espacios tradicionales de enseñanza en los que los estudiantes no son tratados como agentes activos y se trabaja sobre problemas con poca relevancia personal, profesional o social.

Comentarios finales

En este artículo se han resumido resultados de investigaciones sobre el razonamiento de los estudiantes de química que informan la enseñanza de la disciplina. Se ha adoptado una

perspectiva centrada primordialmente en el análisis de estructuras y procesos cognitivos a nivel individual. Sin embargo, el aprendizaje normalmente ocurre en espacios donde las interacciones sociales juegan un papel importante. *Interacciones productivas entre alumnos y entre alumnos y maestros en el salón de clase pueden promoverse a través del trabajo colaborativo en el que los estudiantes construyen conocimientos de manera conjunta* (Hodges, 2018). Estas interacciones requieren que los estudiantes no solo compartan información o conocimientos, sino que también hagan preguntas, escuchen reflexiva y críticamente las ideas de otros y las elaboren (Gillies, 2016). Es a través de estas interacciones que los estudiantes se apropian de una mejor manera de las formas de saber, pensar y actuar en la disciplina.

De manera general, las investigaciones realizadas indican que el desarrollo de formas productivas de razonar en química se promueve en ambientes de aprendizaje en los que (Artze-Vega et al., 2023; Lombardi et al., 2021; Tanner, 2013):

1. El pensamiento inicial de los estudiantes se hace visible y se utiliza para planear la enseñanza.
2. El pensamiento de los estudiantes se enfoca al análisis y reflexión de un número reducido de ideas centrales en la disciplina.
3. Los objetivos de aprendizaje son ambiciosos, se hacen explícitos y son relevantes para los estudiantes a nivel personal, profesional o social.
4. La enseñanza se estructura siguiendo progresiones de aprendizaje basadas en la investigación educativa en el área.
5. El docente proporciona andamiajes conceptuales para guiar el razonamiento de los estudiantes.
6. Los estudiantes colaboran en la construcción de ideas de manera activa e interactiva.
7. Los estudiantes se involucran de manera activa y colaborativa en la construcción de modelos y la generación de explicaciones mecánicas sobre fenómenos de interés.
8. Los docentes proporcionan retroalimentación formativa continua y específica sobre cómo progresar en las formas de saber, pensar y actuar que se valoran.
9. El docente establece estructuras que ayudan a los estudiantes a prepararse para el aprendizaje y a desarrollar hábitos de estudio basados en estrategias elaborativas y metacognitivas.
10. Todos los estudiantes se sienten valorados, respetados, apoyados y significativamente conectados con el docente, sus compañeros de clase y el contenido a aprender.

Crear estos ambientes de aprendizaje demanda acciones intencionales explícitas por parte del docente a múltiples niveles, incluidos cambios curriculares, así como de métodos de instrucción y evaluación que se adapten a las necesidades, intereses y conocimientos previos de los alumnos.

Referencias

- Amin, T. G., & Levrini, O. (Eds.). (2017). *Converging Perspectives on Conceptual Change: Mapping an Emerging Paradigm in the Learning Sciences* (1st ed. ed.). Routledge.
- Amin, T. G., Smith, C. L., & Wiser, M. (2014). Students conceptions and conceptual change: Three overlapping phases of research. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of Science Education Research* (pp. 57-81). Routledge.
- Andersson, B. (1986). The experiential gestalt of causation: a common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 8(2), 155-171.
- Artze-Vega, I., Darby, F., Dewsbury, B., & Imad, M. (2023). *The Norton Guide to Equity-Minded Teaching*. W. W. Norton.
- Barsalou, L. W. (2020). Challenges and Opportunities for Grounding Cognition. *Journal of Cognition*, 3(1), 31.
- Beilin, H. (1992). Piaget's enduring contribution to developmental psychology. *Developmental Psychology*, 28, 191-204.
- Bodner, G. M., & Domin, D. S. (2000). Mental Models: The Role of Representations in Problem Solving in Chemistry. *University Chemistry Education*, 4(1), 24-30.
- Brown, D. E. (2014). Students' Conceptions as Dynamically Emergent Structures. *Science & Education*, 23(7), 1463-1483.
- Brown, D. E., & Hammer, D. (2008). Conceptual change in physics. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 127-154). Routledge.
- Brown, P. C., Roediger Iii, H. L., & McDaniel, M. A. (2014). *Make it stick: The science of successful learning*. The Belknap Press of Harvard University Press.
- Bunce, D. M. (2001). Does Piaget Still Have Anything to Say to Chemists? *Journal of Chemical Education*, 78(8), 1107.
- Chi, M. T. H. (2013). Two kinds and four sub types of misconceived knowledge, ways to change it and the learning outcomes. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 49-71). Routledge.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and Paradigms: a Review of Literature Related to Concept Development in Adolescent Science Students. *Studies in Science Education*, 5(1), 61-84.
- Driver, R., Squires, A., Rushword, P., & Wood-Robinson, V. (1994). *Making Sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas* Routledge.
- Duschl, R., Maeng, S., & Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: a review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182.

- Gabel, D. L., & Bunce, D. M. (1994). Research on problem solving: Chemistry. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 301-326). Macmillan.
- Gillies, R. M. (2016). Dialogic interactions in the cooperative classroom. *International Journal of Educational Research*, 76, 178-189.
- Gopnik, A., & Wellman, H. M. (1994). The theory theory. In L. A. Hirschfeld & S. A. Gelman (Eds.), *Mapping the Mind: Domain Specificity in Cognition and Culture* (pp. 257-293). Cambridge University Press.
- Gordon, C., & Tannen, D. (2023). Framing and related concepts in interactional sociolinguistics. *Discourse Studies*, 25(2), 237-246.
- Grotzer, T. A. (2012). *Learning causality in a complex world: Understandings of consequence*. R&L Education.
- Hartman, J. R., Nelson, E. A., & Kirschner, P. A. (2022). Improving student success in chemistry through cognitive science. *Foundations of Chemistry*, 24(2), 239-261.
- Herron, J. D. (1975). Piaget for chemists. Explaining what “good” students cannot understand. *Journal of Chemical Education*, 52(3), 146.
- Hodges, L. C. (2018). Contemporary Issues in Group Learning in Undergraduate Science Classrooms: A Perspective from Student Engagement. *CBE—Life Sciences Education*, 17(2), es3.
- Johnstone, A. H. (2006). Chemical education research in Glasgow in perspective [10.1039/B5RP90021B]. *Chemistry Education Research and Practice*, 7(2), 49-63.
- Kahneman, D., & Klein, G. (2009). Conditions for intuitive expertise: A failure to disagree. *American Psychologist*, 64, 515-526.
- Kind, V. (2004). *Beyond Appearances: Students' Misconceptions about Basic Chemical Ideas*. Royal Society of Chemistry.
- Lederman, N. G., Zeidler, D. L., & Lederman, J. S. (Eds.). (2023). *Handbook of Research on Science Education* (First ed., Vol. III). Routledge.
- Linn, M. C. (2005). The Knowledge Integration Perspective on Learning and Instruction. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (pp. 243-264). Cambridge University Press.
- Lombardi, D., Shipley, T. F., Bailey, J. M., Bretones, P. S., Prather, E. E., Ballen, C. J., Knight, J. K., Smith, M. K., Stowe, R. L., Cooper, M. M., Prince, M., Atit, K., Uttal, D. H., LaDue, N. D., McNeal, P. M., Ryker, K., St. John, K., van der Hoeven Kraft, K. J., & Docktor, J. L. (2021). The Curious Construct of Active Learning. *Psychological Science in the Public Interest*, 22(1), 8-43.
- Maeyer, J., & Talanquer, V. (2010). The role of intuitive heuristics in students' thinking: Ranking chemical substances. *Science Education*, 94(6), 963-984.

- Malmberg, K. J., Raaijmakers, J. G. W., & Shiffrin, R. M. (2019). 50 years of research sparked by Atkinson and Shiffrin (1968). *Memory & Cognition*, 47(4), 561-574.
- Morewedge, C. K., & Kahneman, D. (2010). Associative processes in intuitive judgment. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(10), 435-440.
- National Research Council. (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition*. The National Academies Press.
- Niaz, M. (1995). Cognitive conflict as a teaching strategy in solving chemistry problems: A dialectic-constructivist perspective. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(9), 959-970.
- Oppenheimer, D. M. (2008). The secret life of fluency. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(6), 237-241.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Potvin, P. (2017). The coexistence claim and its possible implications for success in teaching for conceptual “change”. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 5(1), 55-66.
- Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499-525.
- Sanmarti, N., Izquierdo, M., & Watson, R. (1995). The substantialisation of properties in pupils’ thinking and in the history of science. *Science & Education*, 4(4), 349-369.
- Slotta, J. D., & Chi, M. T. H. (2006). Helping Students Understand Challenging Topics in Science through Ontology Training. *Cognition and Instruction*, 24(2), 261-289.
- Taber, K. S. (1998). An alternative conceptual framework from chemistry education. *International Journal of Science Education*, 20(5), 597-608.
- Taber, K. S. (2002). *Chemical Misconceptions – Prevention, Diagnosis and Cure: Theoretical background* (Vol. I). Royal Society of Chemistry.
- Taber, K. S., & García-Franco, A. (2010). Learning Processes in Chemistry: Drawing Upon Cognitive Resources to Learn About the Particulate Structure of Matter. *Journal of the Learning Sciences*, 19(1), 99-142.
- Talanquer, V. (2006). Commonsense Chemistry: A Model for Understanding Students’ Alternative Conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811.
- Talanquer, V. (2008). Students’ predictions about the sensory properties of chemical compounds: Additive versus emergent frameworks. *Science Education*, 92(1), 96-114.
- Talanquer, V. (2014). Chemistry Education: Ten Heuristics To Tame. *Journal of Chemical Education*, 91(8), 1091-1097.

- Talanquer, V. (2015). Threshold Concepts in Chemistry: The Critical Role of Implicit Schemas. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 3-9.
- Tanner, K. D. (2013). Structure matters: twenty-one teaching strategies to promote student engagement and cultivate classroom equity. *CBE Life Sci Educ*, 12(3), 322-331.
- Tümay, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: emergence in chemistry and its implications for chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(2), 229-245.
- Vosniadou, S. (Ed.). (2013). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. Routledge.
- Vosniadou, S. (2019). The Development of Students' Understanding of Science [Perspective]. *Frontiers in Education*, 4, 32.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967.