

¿Cómo progresan las ideas de los estudiantes sobre las relaciones estructura-propiedades?

How do students' ideas about structure-property relationships progress?

Vicente Talanquer / Department of Chemistry and Biochemistry, University of Arizona, Tucson AZ, 85745 US



resumen

La investigación educativa en enseñanza de la química en los últimos 40 años ha revelado que el razonamiento de los estudiantes sobre las relaciones que existen entre la estructura submicroscópica de las sustancias y sus propiedades macroscópicas observables cambia significativamente durante su paso por la escuela. En este artículo se presenta una descripción y análisis de los cambios más notables en esta área y de sus consecuencias en el diseño de actividades de aprendizaje que ayuden a los estudiantes a progresar en sus ideas.

palabras clave

Aprendizaje, composición, estructura, propiedad, progresión de aprendizajes.

abstract

Research in chemical education in the last 40 years has shown that student reasoning about the relationships between the submicroscopic structure of substances and their macroscopic observable properties changes significantly with schooling. This paper describes and analyzes major changes in this area and discusses their relevance in the design of instructional activities that foster progression in student understanding.

keywords

Learning, composition, structure, property, learning progression.

Introducción

Los estándares educativos en los Estados Unidos y otras partes del mundo enfatizan la importancia de desarrollar formas de razonar que ayuden a los estudiantes a darle sentido a las propiedades y comportamientos de los sistemas que los rodean (NRC, 2007). Para alcanzar este objetivo, se recomienda identificar conceptos y formas de pensar transversales que se aplican en contextos variados para generar explicaciones y construir argumentos y justificaciones. Las relaciones «estructura-propiedad» (o su análogo «estructura-fun-

ción» en biología) encapsulan una de estas formas transversales de pensar que nos ayuda a utilizar conocimientos sobre la composición y estructura submicroscópica de las sustancias para explicar y predecir sus propiedades y comportamientos observables a nivel macroscópico (Talanquer, 2018; 2020).

Los resultados de diversas investigaciones sobre el aprendizaje en química en los últimos 40 años (Cooper & Stowe, 2018) proporcionan información que permite inferir cómo las ideas de los estudiantes sobre relaciones estructura-propiedades típica-

mente progresan a medida que avanzan en sus estudios. En esta contribución se resumen y organizan resultados importantes en esta área para resaltar las dificultades que la mayoría de los estudiantes enfrentan para construir y utilizar estas relaciones de manera normativa (de acuerdo a las normas aceptadas en química) y productiva, y las estrategias de enseñanza que favorecen el aprendizaje significativo en esta área.

Progresiones de aprendizaje

Una progresión de aprendizaje es una propuesta de organización

de contenidos, actividades de aprendizaje y evaluaciones que favorece la comprensión de una idea central en una disciplina (Duschl, Maeng & Sezen, 2011). Estas progresiones se construyen con base en resultados de investigaciones educativas sobre las ideas y formas de razonar de los estudiantes en cierta área. La progresión toma en cuenta las ideas iniciales comunes de los alumnos (lo que define el nivel más bajo de la progresión) y describe estrategias para avanzar en la comprensión y formas de razonar en dirección del concepto científico que se quiere que los estudiantes construyan (lo que define el nivel más alto de la progresión).

El objetivo central de este trabajo no es presentar una progresión de aprendizaje completa para desarrollar el pensamiento de los estudiantes sobre relaciones estructura-propiedades, sino resumir resultados de investigaciones existentes en esta área que puedan facilitar el trabajo docente. En particular, en este artículo se organizan y discuten ideas que los maestros deben considerar en el diseño y secuenciación de actividades de aprendizaje y evaluaciones que ayuden a los estudiantes a conectar información sobre la composición y estructura de las sustancias a nivel submicroscópico y sus propiedades físicas y químicas observables.

El razonamiento estructura-propiedades en química

El razonamiento químico se sustenta en una variedad de modelos que conectan las propiedades de un sistema de interés con la composición y estructura de sus componentes (Talanquer, 2018; 2020). Estos modelos representan sistemas a múltiples escalas (ver fig. 1), desde el nivel macroscópico hasta el nivel

electrónico (Talanquer, 2011), y relacionan las propiedades de un sistema en una escala con las propiedades y comportamiento de los componentes en una subescala. Por ejemplo, las propiedades de un jabón líquido para lavar platos (nivel macroscópico multi-componente) se pueden explicar en términos de las propiedades del agua y del surfactante que lo componen, y de las interacciones entre ellas (nivel macroscópico uni-componente). De manera análoga, las propiedades físicas de cada una de estas sustancias se pueden explicar con base en las interacciones dinámicas entre las partículas que las componen (nivel corpuscular), y la naturaleza de tales interacciones se puede relacionar con la composición y estructura de las diferentes partículas a nivel molecular.

Las relaciones estructura-propiedades en química se construyen utilizando razonamiento asociativo o razonamiento mecanístico dependiendo de los objetivos que se tengan (fig. 2). En ocasiones estas relaciones se expresan de manera automática como asociaciones directas entre una propiedad del sistema y una característica de sus componentes. Por ejemplo, la temperatura de ebullición de un líquido se relaciona con fuerzas intermoleculares entre las partículas que lo constituyen. En otras situaciones se requiere construir historias causales, o mecanismos, que conectan el comportamiento de los componentes en una subescala con las propiedades observadas en la siguiente escala. En estas explicaciones se asume que estas propiedades «emergen» de las

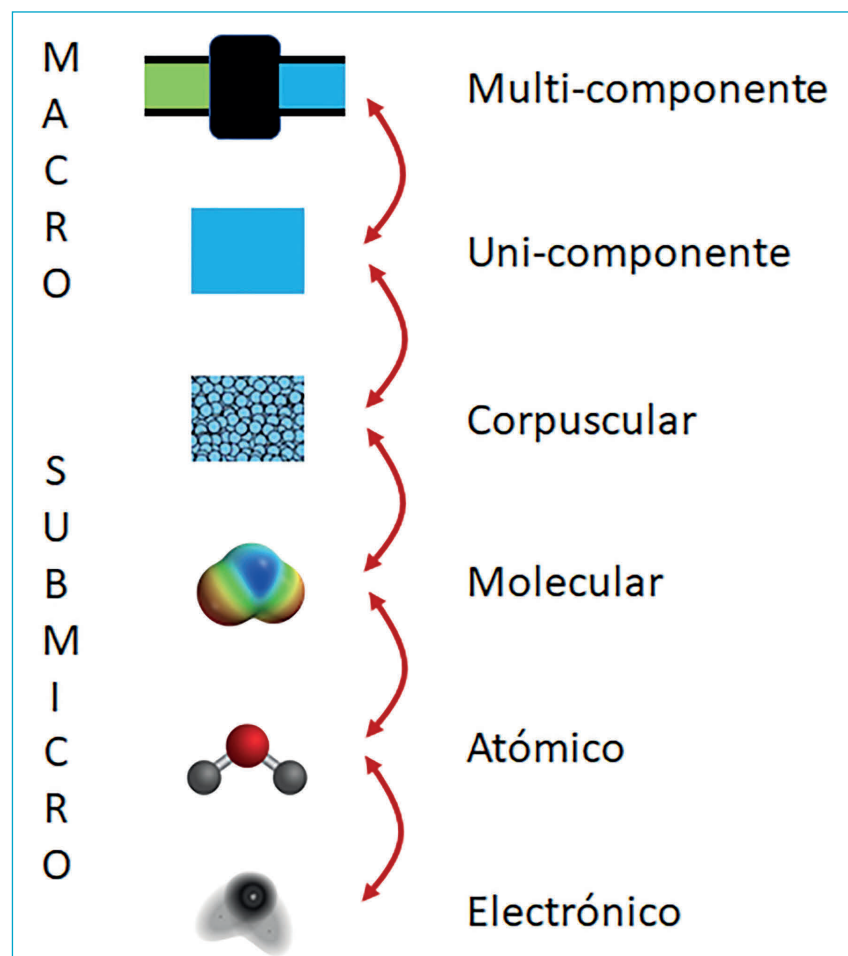


Figura 1. Diferentes escalas en las que se construyen relaciones estructura-propiedades en química.

interacciones dinámicas entre los componentes. Esto es, se trata de propiedades que son resultado de dichas interacciones y no están presentes en los componentes individuales (Talanquer, 2008).

Dada la naturaleza del razonamiento que se requiere para construir relaciones estructura-propiedades, cabe esperar que los estudiantes de química tengan dificultades para generarlas y utilizarlas de manera normativa y productiva. El análisis de los resultados de investigaciones educativas en esta área sugiere que las dificultades son distintas dependiendo del tipo de sistema o fenómeno bajo análisis. En particular podemos distinguir dos grandes casos. Situaciones en las que se busca explicar propiedades intrínsecas de las sustancias y situaciones en las que el interés se centra en explicar su comportamiento cuando interaccionan con otros materiales. En las siguientes secciones se discuten de manera separada cada uno de estos casos.

Progresión en el razonamiento sobre propiedades intrínsecas de las sustancias

Aunque las ideas de los estudiantes sobre el origen de las propiedades de las sustancias cambian con su aprendizaje en química, el razonamiento en esta área tiende a estar guiado por un esquema cognitivo en el que se asume que las propiedades observables resultan de la presencia de componentes con esas mismas propiedades. La naturaleza de los componentes que se invocan varía de una etapa educativa a otra, pero el esquema persiste. Se trata de un esquema en el que el razonamiento se centra en el análisis de la «composición» de un sistema, ignorando las características estructurales de los componentes y las variadas interacciones entre ellos. Sin embargo, el razonamiento de

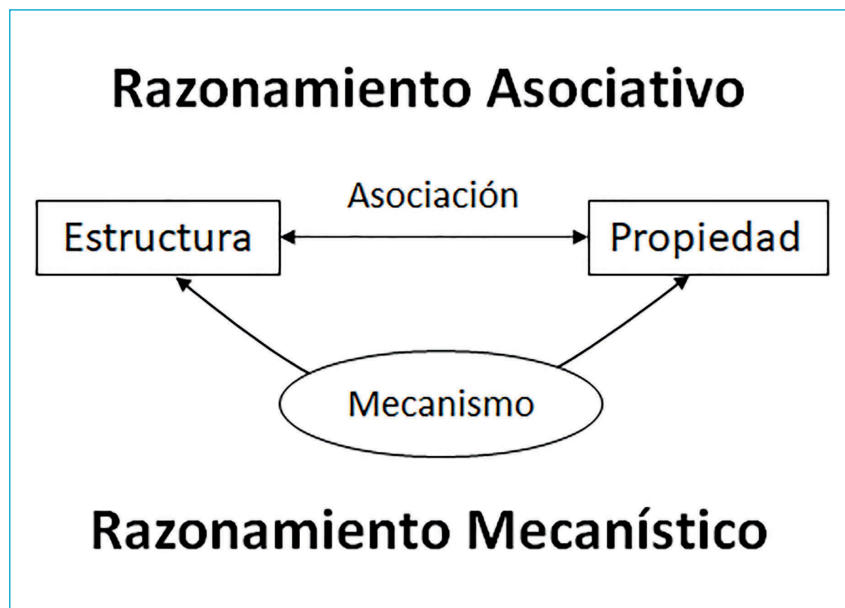


Figura 2. Tipos de razonamiento utilizados en la construcción de relaciones estructura-propiedades.

los estudiantes progresa en otras áreas y tiende a avanzar a través de las siguientes etapas:

I. Eclecticismo intuitivo

Los estudiantes jóvenes tienden a razonar de manera variable sobre diferentes tipos de sustancias. En algunos casos asumen que ciertas sustancias tienen propiedades intrínsecas, como el agua que se asume inherentemente líquida. Las propiedades de muchos materiales se explican entonces asumiendo la presencia de componentes que les otorgan las propiedades observadas. Por ejemplo, el alcohol es líquido porque contiene agua y el cobre es rojizo porque contiene sustancias que son rojas (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014). En esta etapa, muchos estudiantes tienden a «sustancializar» las propiedades observables atribuyéndoles características materiales (por ejemplo, las sustancias más calientes contienen más calor).

II. Macro-composicionismo

A medida que los estudiantes ganan experiencia trabajando con distintos materiales y reciben

más información sobre ellos, es común que construyan asociaciones simples entre las propiedades de las sustancias y su origen, historia, uso o comportamiento. Por ejemplo, en la escuela los estudiantes aprenden que se requiere oxígeno para producir fuego, y que el aluminio y la plata son metales brillantes. Este conocimiento frecuentemente se combina con un esquema aditivo para dar sentido a las propiedades de los materiales y explicarlas. Por ejemplo, en esta etapa es común que los estudiantes piensen que las sustancias inflamables contienen oxígeno y que todos los compuestos de aluminio y plata, como el cloruro de plata, deben ser sustancias con brillo (Talanquer, 2013).

III. Corpuscularismo

Cuando los estudiantes aprenden que las sustancias están constituidas por pequeñas partículas (o corpúsculos), las relaciones estructura-propiedades que construyen se modifican. Sus explicaciones empiezan a hacer referencia a las propiedades inherentes de las partículas que conforman a los distintos mate-

riales. Sin embargo, las propiedades de estas partículas comúnmente se infieren de las propiedades macroscópicas observables de las sustancias bajo análisis. Por ejemplo, los estudiantes pueden pensar que las partículas de cobre son rojizas y maleables como este metal (Kind, 2004). Las partículas se conciben como pequeños pedazos del material. Las relaciones estructura-propiedades que los estudiantes construyen en esta etapa tienden a basarse en razonamiento asociativo y no mecanístico.

IV. Composicionismo atómico

Cuando los estudiantes reconocen a los átomos como componentes básicos de la materia, sus explicaciones sobre las propiedades de las sustancias se centran en el número y características de los átomos presentes en ellas, sin prestar mucha atención a características estructurales (Talanquer, 2008; 2013). Su razonamiento se guía por la composición elemental de las sustancias y no por el análisis de su estructura submicroscópica. Asumen, por ejemplo, que ciertos tipos de átomos tienen características inherentes que son heredadas por las sustancias que los contienen (los átomos de hidrógenos son ácidos). A medida que los estudiantes avanzan en sus estudios pueden reconocer otras propiedades atómicas (como electronegatividad), pero su análisis continúa basándose en la asociación directa entre estas características atómicas y las propiedades observadas (por ejemplo, sustancias con átomos más electronegativos son más reactivas). En esta etapa, muchos alumnos conceptualizan a las sustancias como mezclas de átomos sin considerar los efectos que diferentes tipos de enlaces y fuerzas intermoleculares tienen sobre sus propiedades.

V. Composicionismo funcional

En cursos más avanzados de química, los estudiantes comienzan a construir relaciones estructura-propiedades prestando atención a la presencia de ciertos grupos de átomos (grupos funcionales) que se asocian con ciertas propiedades (Graulich, 2015). Por ejemplo, la presencia de grupos -OH en moléculas de alcoholes puede asociarse de manera normativa con la formación de puentes de hidrógeno y puntos de ebullición más altos. Sin embargo, otros estudiantes pueden considerar de manera incorrecta que la presencia de este grupo es indicativa de propiedades básicas. La atención a grupos funcionales es un paso importante en el reconocimiento de elementos estructurales que afectan a las propiedades de los materiales.

VI. Interaccionismo estructural

Los resultados de investigaciones existentes sugieren que pocos estudiantes terminan sus cursos de química desarrollando una visión interaccionista estructural en la que se entiende que las propiedades observables emergen de las interacciones dinámicas entre partículas, y que la naturaleza de tales interacciones depende no sólo de la composición sino también de la estructura de tales partículas. Por ejemplo, pocos alumnos comprenden que las transiciones de fase en compuestos moleculares son fenómenos cooperativos cuyas características dependen de interacciones entre moles de moléculas y que, a su vez, la magnitud y alcance de tales interacciones está determinada por la naturaleza y distribución de los átomos en dichas moléculas. El razonamiento de una gran mayoría de estudiantes permanece limitado no sólo por la atención centrada en aspectos composicionales y la suposición de que

los componentes de un sistema tienen características intrínsecas que de manera aditiva determinan las propiedades observables, sino también por una conceptualización determinista, estática y homogénea del mundo submicroscópico, como se discute en la siguiente sección.

Progresión en el razonamiento sobre el comportamiento de las sustancias

Algunas propiedades de las sustancias, como su solubilidad en agua y su reactividad, se manifiestan a través de cambios que resultan de la interacción con otros materiales. Aunque el razonamiento de los estudiantes en estas áreas progresa con sus estudios, sus ideas comúnmente se guían por un esquema cognitivo en el que se asume que los eventos observados resultan de las acciones de un agente activo con cierta intencionalidad o propósito. Los efectos causados por este agente se consideran proporcionales a sus propiedades, como su tamaño y su peso, o a su proximidad en el espacio y tiempo (Talanquer, 2006). Esta forma de pensar se conoce como «causalismo centralizado» y tiende a avanzar a través de las siguientes etapas:

I. Causalismo centralizado a nivel macro

En ausencia de conocimientos básicos de física y química, las explicaciones de los estudiantes sobre el comportamiento de las sustancias son variables y dependen del tipo de proceso bajo análisis. Procesos que ocurren de manera espontánea sin la acción de un agente visible normalmente se atribuyen a la disposición natural o necesidad del sistema de alcanzar cierto estado (Talanquer, 2006). Por ejemplo, las sustancias calientes se enfrían porque buscan el equilibrio

térmico. Si un agente causal es identificado, el comportamiento observado se atribuye a sus acciones. Por ejemplo, la sal se disuelve en agua porque este líquido la «funde».

II. Causalismo centralizado a nivel multi-partículas

Cuando los estudiantes comienzan a construir explicaciones utilizando el modelo corpuscular, sus explicaciones frecuentemente se basan en la acción directa de ciertos componentes o en la atribución de intencionalidad o tendencias en el comportamiento de las partículas que conforman un sistema. Por ejemplo, la disolución de sal en agua se explica considerando la acción de las partículas de agua sobre las partículas de sal, pero la difusión de un colorante en agua se puede explicar por la tendencia del colorante a distribuirse homogéneamente en el líquido (Talanquer, 2013). En esta etapa se incrementa la aplicación de razonamiento mecanístico en función de colisiones, atracciones y repulsiones entre partículas, pero se atribuye más influencia a las partículas más grandes, más pesadas, más rápidas o con una mayor carga eléctrica.

III. Causalismo centralizado a nivel atómico

Diversos estudios han mostrado que cuando los estudiantes utilizan modelos atómicos para generar relaciones estructura-propiedades, es frecuente que se refieran a las necesidades o intenciones de los átomos (Taber, 1998). Por ejemplo, se asume que los átomos pierden o ganan electrones con el fin de ganar estabilidad o adquirir un octeto en la capa de valencia (forma de explicar que muchas veces es introducida y reforzada por los docentes de químicas). Algunos átomos se conciben como más

activos que otros, por ejemplo átomos con una electronegatividad más alta o con mayor radio atómico o con más masa.

IV. Estabilismo energético

En clases de química es común construir explicaciones que se basan en la comparación de la estabilidad de distintas especies considerando su energía potencial relativa. Los estudiantes tienden a reducir estas explicaciones a argumentos teleológicos basados en la tendencia natural de los átomos o moléculas a buscar la estabilidad o minimizar su energía (Taber, 1998). Este tipo de argumentos evitan el razonamiento mecanístico y lo sustituyen por el razonamiento asociativo que relaciona ciertas características composicionales o estructurales con estabilidad. Por ejemplo, las partículas cargadas eléctricamente se consideran menos estables que las neutras, o las moléculas con enlaces más fuertes son menos reactivas. Este tipo de asociaciones son muy productivas en el pensamiento químico, pero frecuentemente limitan el razonamiento de los estudiantes que desconocen las causas que las justifican. Es común que los estudiantes ignoren interacciones

entre distintas variables y la naturaleza probabilística del comportamiento químico hasta que alcanzan la etapa de interaccionismo estructural descrita en la sección anterior.

Implicaciones para la enseñanza

Los resultados de las investigaciones en educación química resumidos en este artículo sugieren que la progresión en el razonamiento de los estudiantes sobre relaciones estructura-propiedad ocurre gradualmente a medida que avanzan en sus estudios y asimilan diferentes modelos químicos sobre la composición y estructura de la materia (Talanquer, 2018). Su razonamiento está guiado por esquemas cognitivos intuitivos que persisten de una etapa a otra. Estos esquemas le dan prioridad al análisis de la composición sobre la estructura de los componentes de un sistema, le atribuyen intencionalidad al comportamiento de estos componentes, y asumen relaciones directas entre las propiedades de entidades a nivel submicroscópico y las propiedades macroscópicas observables.

El razonamiento de los estudiantes es asociativo en la mayoría de las etapas analizadas

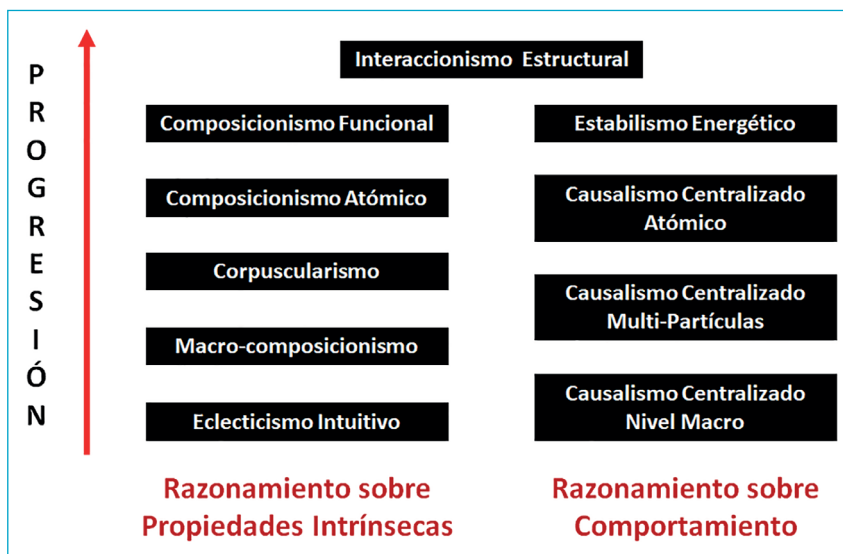


Figura 3. Etapas en la progresión del razonamiento sobre relaciones estructura-propiedades.

(resumidas en la fig. 3), y pocos alumnos desarrollan la capacidad de utilizar el razonamiento mecanístico para generar explicaciones. La construcción de este tipo de explicaciones es compleja y demanda la diferenciación e integración de conceptos definidos a diferentes escalas.

El análisis del aprendizaje de estudiantes trabajando con currículos alternativos en química indica que proyectos que involucran a los estudiantes de manera activa en el desarrollo, aplicación y evaluación de modelos (modelización) para hacer predicciones, generar explicaciones y construir argumentos en distintos contextos promueven la progresión del razonamiento usando relaciones estructura-propiedades (Cooper *et al.*, 2012). De manera similar, intervenciones educativas que consistentemente requieren que los estudiantes construyan explicaciones mecanísticas sobre las propiedades y el comportamiento de sistemas relevantes tienen efectos positivos significativos en esta área (Sevian & Talanquer, 2014).

El análisis de las etapas en la progresión del razonamiento de los estudiantes sobre relaciones estructura-propiedad que se presenta en la fig. 3 sugiere una secuencia de aprendizaje que mejor apoye la construcción de conocimientos en esta área. En particular, es recomendable seguir una secuencia que comience con el análisis de propiedades distintivas de las sustancias a nivel macroscópico y gradualmente motive la construcción de distintos modelos submicroscópicos sobre estructura de los materiales a diferentes escalas que permitan explicar y predecir las diferencias observadas (ver fig. 4). De manera más específica se propone:

a) Involucrar a los estudiantes en el análisis y discusión de

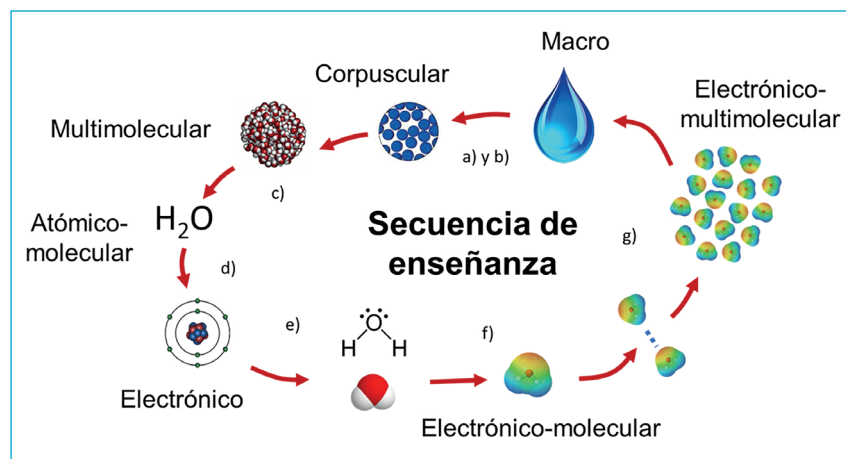


Figura 4. Secuencia propuesta en la enseñanza de relaciones estructura-propiedad.

resultados experimentales sobre propiedades macroscópicas de las sustancias que sirven para distinguirlas e identificarlas. Estas propiedades diferenciadoras (como puntos de ebullición y fusión, densidad, viscosidad, solubilidad en agua) son propiedades intensivas con valores definidos para cada tipo de sustancia en condiciones de temperatura y presión especificadas.

b) Motivar la construcción del modelo corpuscular de la materia para explicar las diferencias en propiedades macroscópicas diferenciadoras con base en diferencias en las interacciones dinámicas existentes entre las partículas que constituyen a cada sustancia (por ejemplo, sustancias constituidas por partículas que interactúan más fuertemente tendrán puntos de ebullición más altos).

c) Involucrar a los estudiantes en el análisis y discusión de resultados experimentales que dan información sobre propiedades distintivas de las partículas que constituyen a las distintas sustancias (como masa y composición elemental de las partículas) y utilizar este análisis para motivar la construcción de modelos atómicos sencillos que diferencien sustancias con base en la composición atómica de las partículas constituyentes.

d) Involucrar a los estudiantes en el análisis y discusión de resultados experimentales que dan información sobre propiedades distintivas de cada tipo de átomo (como naturaleza eléctrica, radio atómico, energía de ionización) y utilizar este análisis para motivar la construcción de modelos atómicos a nivel electrónico que diferencien a los átomos con base en la distribución interna de sus electrones.

e) Involucrar a los estudiantes en el análisis y discusión de resultados experimentales que dan información sobre la conectividad y distribución espacial de las unidades submicroscópicas básicas en sistemas moleculares, iónicos y metálicos (como absorción de radiación infrarroja y de rayos X, conductividad eléctrica) y utilizar este análisis para motivar la construcción de modelos estructurales sobre estas sustancias.

f) Involucrar a los estudiantes en el análisis y discusión de resultados experimentales que dan información sobre la distribución de electrones en sistemas moleculares, iónicos y metálicos (como comportamiento observado en la presencia de objetos con carga eléctrica) y utilizar este análisis para motivar la construcción de modelos sobre distribución de carga a nivel submicroscópico.

g) Utilizar modelos estructura-

les y de distribución de carga a nivel submicroscópico para inferir diferencias en las interacciones existentes entre las partículas que constituyen a diferentes sustancias, y usar estas inferencias para explicar y predecir diferencias en propiedades macroscópicas observadas.

La secuencia de enseñanza que se propone se basa en el uso sistemático de datos experimentales para guiar la construcción de modelos más sofisticados sobre la estructura de la materia y el uso de esos modelos para explicar y predecir las observaciones. La secuencia se inicia en el nivel macro y gradualmente transita a través de las distintas escalas submicroscópicas representadas en las fig. 1 y 4, para eventualmente integrar los conocimientos adquiridos sobre modelos químicos a diversas escalas en la explicación y predicción de las propiedades físicas y químicas macroscópicas de las sustancias. En general, el aprendizaje de los estudiantes se facilita a través de actividades en las que analizan datos, identifican patrones, construyen y aplican modelos de sistemas a diferentes escalas, representan sus ideas en múltiples formas (dibujos, diagramas, gráficas), construyen argumentos de manera colaborativa y generan explicaciones de múltiples sistemas en diversos contextos. Durante este trabajo es deseable que los estudiantes hagan públicas sus ideas, las analicen y discutan colectivamente, y reciban retroalimentación formativa frecuente sobre sus formas de pensar.

Referencias

- COOPER, M. M.; STOWE, R. (2018). «Chemistry education research-From personal empiricism to evidence, theory, and informed practice». *Chemical Reviews*, n.º 118, p. 6053-6087.
- COOPER, M. M.; UNDERWOOD, S. M.; HILLEY, C. Z.; KLYMKOWSKY, M. W. (2012). «Development and assessment of a molecular structure and properties learning progression». *Journal of Chemical Education*, n.º 89, p. 1351-1357.
- DUSCHL, R.; MAENG, S.; SEZEN, A. (2011). «Learning progressions and teaching sequences: a review and analysis». *Studies in Science Education*, vol. 47, n.º 2, p. 123-182.
- GRAULICH, N. (2015). «Intuitive judgments govern students' answering patterns in multiple-choice exercises in organic chemistry». *Journal of Chemical Education*, n.º 92, p. 205-211.
- KIND, V. (2004). *Beyond appearances: students' misconceptions about basic chemical ideas*, 2nd ed., Londres: Royal Society of Chemistry. También disponible en línea en: <<https://edu.rsc.org/resources/beyond-appearances/2202.article>> [Consulta: 7 mayo 2021].
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). (2007). *Taking science to school: learning and teaching science in grades K-8*. Washington, DC: National Academies Press.
- NGAI, C.; SEVIAN, H.; TALANQUER, V. (2014). «What is this substance? What makes it different? Mapping progression in students' assumptions about chemical identity». *International Journal of Science Education*, n.º 36, p. 2438-2461.
- SEVIAN, H.; TALANQUER, V. (2014). «Rethinking chemistry: a learning progression on chemical thinking». *Chemistry Education Research and Practice*, n.º 15, p. 10-23.
- TABER, K. S. (1998). «An alternative conceptual framework from chemistry education». *International Journal of Science Education*, n.º 20, p. 597-608.
- TALANQUER, V. (2006). «Common sense chemistry: a model for understanding students' alternative conceptions». *Journal of Chemical Education*, vol. 83, n.º 5, p. 811-816.
- (2008). «Students' predictions about the sensory properties of chemical compounds: Additive versus emergent frameworks». *Science Education*, n.º 92, p. 96-114.
- (2011). «Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry "triplet"». *International Journal of Science Education*, vol. 33, n.º 2, p. 179-195.
- (2013). «How do students reason about chemical substances and reactions?». En: TSAPARLIS, G.; SEVIAN, H. (ed.). *Concepts of matter in science education*. Dordrecht: Springer, p. 331-346.
- (2018). «Progression in reasoning about structure-property relationships». *Chemistry Education Research and Practice*, n.º 19, p. 998-1009.
- (2020). «La progresión de los aprendizajes sobre la composición, estructura y transformación química de la materia». *Educació Química EduQ*, n.º 27, p. 4-11.



Vicente Talanquer

Es profesor en la Universidad de Arizona. Autor o coautor de más de diez libros de primaria y secundaria y de más de cien artículos arbitrados de investigación en educación química y pensamiento docente. Su trabajo se centra en el estudio de las formas de razonamiento de los estudiantes y de los profesores de química.
C. e.: vicente@arizona.edu