



Hacia una progresión de aprendizaje multidimensional del modelo escolar de sustancia

Towards a multidimensional learning progression of the school substance model

Ainoa Marzábal¹, Franklin Manrique², Virginia Delgado¹ y Patricia Moreira³

Resumen

Dadas las implicaciones sociales y ambientales de los materiales en la vida actual, el modelo de sustancia se encuentra presente en todos los currículos escolares de Química. A pesar de existir un extenso corpus de literatura en torno a los procesos de aprendizaje de este modelo, la mayoría de las progresiones de aprendizaje se han centrado en una sola dimensión, proporcionando visiones parciales de cómo los estudiantes se van apropiando de ideas clave y van aprendiendo a aplicarlas en situaciones nuevas y desafiantes. En este artículo proponemos una progresión de aprendizaje multidimensional para el modelo de sustancia, caracterizando la forma en que se espera que progresen las ideas clave, las formas de razonamiento y las representaciones de los sistemas materiales. La progresión de aprendizaje, refinada empíricamente a partir de las producciones de 343 estudiantes de entre 13 y 18 años, se compone de seis estadios que constituyen la trayectoria esperada de los estudiantes, desde el estadio objetivista hasta el interaccionista. Esta progresión de aprendizaje puede ser usada tanto por investigadores como por profesores para avanzar hacia visiones más sofisticadas de las sustancias, que permitan a los estudiantes abordar los desafíos que el ejercicio de la ciudadanía demanda en la sociedad actual.

Palabras clave

Material, sustancia, currículo, progresión de aprendizaje, ciudadanía.

Abstract

Given the social and environmental implications of materials in today's life, the substance model is present in all school chemistry curricula. Although there is an extensive body of literature on the learning processes of this model, most learning progressions have focused on a single dimension, providing partial views of how students appropriate key ideas and learn to apply them in new and challenging situations. In this paper we propose a multidimensional learning progression for the substance model, characterizing how key ideas, forms of reasoning, and representations of material systems are expected to progress. The learning progression, empirically refined from the productions of 343 students aged 13-18, is composed of six stages that constitute the expected trajectory of students from the objectivist to the interactionist stage. This learning progression can be used by both researchers and teachers to move towards more sophisticated visions of substances, which allow students to address the challenges that the exercise of citizenship demands in today's society.

Keywords

Material, substance, curriculum, learning progression, citizenship.

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile.

² Universidad De Santiago de Chile.

³ University of Arizona.

Introducción

El estudio de los constituyentes básicos de la materia ha sido —y continúa siendo— uno de los grandes desafíos de la Química, que ha permitido establecer principios como la conservación y la periodicidad (Raviolo et al., 2011). Estos principios se han aplicado al análisis de los materiales a través de la identificación y la separación de sus componentes, su transformación en nuevos materiales y la síntesis de nuevas sustancias (Talanquer, 2016). Es evidente que la Química de los materiales ha contribuido decisivamente en múltiples campos como la farmacología, la agronomía, la industria o las telecomunicaciones, mejorando nuestra calidad de vida; pero también que ha tenido un impacto irreversible en el medio ambiente (Merrit y Krajcik, 2013).

Dadas las profundas implicaciones sociales, políticas, económicas y ambientales de las sustancias y materiales en la vida actual, las sustancias aparecen prácticamente en todos los currículos de Química escolar (Talanquer, 2018; Cooper y Stowe, 2018; Mahaffy et al., 2019). Los procesos de aprendizaje de los estudiantes para construir representaciones sobre los materiales han sido ampliamente documentadas (Talanquer, 2009, 2016; Stevens et al., 2010; Hadenfeldt et al., 2013; Merrit y Krajcik, 2013). De estos estudios han emanado progresiones de aprendizaje esperadas a nivel escolar, que han tratado de contribuir a superar la naturaleza descriptiva de los conocimientos sobre las sustancias que presentan los estudiantes hasta ahora, y su escasa aplicabilidad (Wiser et al., 2012).

A pesar de existir un extenso corpus de literatura en este campo, las progresiones de aprendizaje para las sustancias se han enfocado generalmente en una sola dimensión: ya sean los conceptos o ideas clave (Moltó et al., 2021), o las formas de razonamiento involucradas (Stains y Talanquer, 2007). En las discusiones más recientes en este campo se ha señalado la necesidad de avanzar hacia progresiones de aprendizaje multidimensionales que puedan dar cuenta del aprendizaje progresivo de ideas clave de la ciencia escolar, pero también de cómo los estudiantes van aprendiendo a aplicar estas ideas en situaciones nuevas y desafiantes (Krajcik y Shin, 2023).

En consideración al problema de investigación planteado, en este artículo presentamos una progresión de aprendizaje multidimensional para las sustancias. Esta progresión caracteriza el proceso mediante el cual los estudiantes van incorporando nuevas ideas y formas de razonamiento que les permiten construir representaciones cada vez más sofisticadas de los sistemas materiales para tomar decisiones en el contexto de situaciones relevantes para el ejercicio de la ciudadanía.

El modelo escolar de sustancia

Para Raviolo, Garrity y Sosa, una sustancia es una *forma de materia homogénea de composición elemental fija que posee propiedades específicas que la diferencian de otras* (Raviolo et al., 2011: 244). Para estos autores, *sustancia* puede considerarse como un concepto central de la Química escolar (Raviolo et al., 2011). Sin embargo, construir representaciones de los sistemas materiales para evaluar los beneficios y riesgos asociados a los materiales y sus usos, a partir del establecimiento de relaciones entre las propiedades de las sustancias que los componen, su comportamiento físico y químico y su estructura interna, parece requerir un volumen de saberes que trascienden el estatus conceptual atribuido por estos autores (Marzábal et al., 2021).

Desde nuestra perspectiva, sería más apropiado considerar *sustancia* como un modelo químico escolar (Adúriz-Bravo e Izquierdo-Aymerich, 2009). Los modelos han jugado un papel central en la educación científica en las últimas décadas, al identificar el potencial de estas representaciones similares a los hechos del mundo para facilitar la comprensión conceptual y la resolución de problemas (Chiu y Lin, 2019). Desde la perspectiva semanticista, los modelos científicos escolares son las reconstrucciones teóricas de los fenómenos o hechos del mundo de los estudiantes. Estas reconstrucciones son representaciones simplificadas y parciales de objetos, procesos o fenómenos que se construyen con determinados propósitos (Oh y Oh, 2011; Ariza, 2022), y que constituyen intermediarios entre la teoría que esperamos que los estudiantes aprendan, y el mundo que esperamos que modelicen (Soto y Couso, 2021). Estas representaciones se construyen con base en las proposiciones teóricas que se asocian al modelo, pero también de un conjunto de supuestos y formas de razonamiento que permiten establecer la conexión entre estas afirmaciones generales, y su aplicación a contextos particulares (Ngai et al., 2014).

Pensar en *sustancia* como un modelo químico escolar implica entonces reconocer la naturaleza compleja y multidimensional de las representaciones que construyen los estudiantes de los sistemas materiales a lo largo de la escolaridad. La progresión del aprendizaje del modelo de sustancia representaría la manera en que se espera que los estudiantes vayan transitando desde las visiones intuitivas de las sustancias, basadas en sus experiencias y percepciones, hacia visiones más complejas que les permitan analizar, predecir y explicar fenómenos químicos relevantes para el ejercicio de la ciudadanía. Aun cuando las progresiones de aprendizaje de los estudiantes para construir representaciones sobre los materiales, las sustancias, las partículas, y sobre su comportamiento físico y químico han sido ampliamente documentadas (Talanquer, 2009, 2016; Stevens et al., 2010; Hadenfeldt et al., 2013; Merrit y Krajcik, 2013), las propuestas hasta ahora se han centrado en la caracterización de una sola dimensión del conocimiento científico: las ideas clave o las prácticas o formas de razonamiento (Krajcik y Shin, 2023).

Dadas las limitaciones de las progresiones de aprendizaje centradas en una sola dimensión del modelo de sustancia, se sugiere explorar las articulaciones posibles entre ellas, y su posterior refinamiento empírico para la construcción de progresiones multidimensionales. Para ello es posible construir un marco explicativo considerando las formas de razonamiento o de pensamiento químico prototípicas (Ngai y Sevia, 2017; Talanquer, 2018; Cooper and Stowe, 2018), las ideas clave del modelo de sustancia (Liu y Lesniak, 2006; Moltó et al., 2021) y las representaciones de los sistemas materiales que los estudiantes construyen con ellas (Russ et al., 2009).

Dimensión 1: Las formas de razonamiento asociadas a la identidad química de las sustancias

Para Ngai, Sevia y Talanquer la identidad química y el razonamiento estructura-propiedad están en el centro del modelo químico escolar de sustancia. Estas formas de razonamiento se basan en la suposición de que las propiedades físicas y químicas y el comportamiento de las sustancias están determinadas por la composición y estructura de sus componentes (Ngai et al., 2014). A lo largo de la escolaridad, las asociaciones que los estudiantes van estableciendo entre la composición de los materiales y sus propiedades se van robusteciendo, lo que permite construir representaciones cada vez más sofisticadas de las sustancias que componen un material y de sus transformaciones.

Estos autores destacan cuatro formas de razonamiento de los estudiantes sobre la identidad química de las sustancias con niveles crecientes de sofisticación (Figura 1): (a) el objetivismo, (b) el principismo, (c) el composicionismo y (d) el interaccionismo (Ngai et al., 2014; Sevia et al., 2015; Talanquer, 2018).



FIGURA 1. Progresión del razonamiento sobre la identidad química (Ngai et al., 2014).

El *objetivismo* constituye la forma de razonamiento inicial en torno a las sustancias que emerge intuitivamente de la experiencia. Los estudiantes usan la apariencia de una sustancia para identificarla, asumiendo que propiedades explícitas como la forma, el color, la textura o el olor son característicos de ésta y permiten reconocerla y distinguirla de otras sustancias (Ngai et al., 2014, Sevia et al., 2015). Este tipo de razonamiento se asocia curricularmente a los primeros años de la educación básica (Liu y Lesniak, 2005; Stevens et al., 2010; Hadenfledt et al., 2014, Talanquer, 2020), sin embargo, varios estudios han mostrado que se trata de una forma de razonamiento persistente, que aparece recurrentemente en estudiantes de educación básica, secundaria y superior (Wiser et al., 2012). El razonamiento objetivista presenta limitaciones en la identificación de las sustancias, al restringir las propiedades consideradas solamente a aquellas que pueden ser percibidas, y al reducir los criterios de identificación, en muchos casos, solamente a una propiedad explícita (Stains y Talanquer, 2007). Dado que los criterios de identificación objetivistas son insuficientes para distinguir inequívocamente las sustancias, esto puede llevar a conductas de riesgo en la vida cotidiana de ciudadanos que aplican esta forma de razonamiento intuitiva.

Los estudiantes progresan al pensamiento *principista* al reconocer las limitaciones de la percepción, e incorporar instrumentos y técnicas experimentales para aplicar un mayor rango de propiedades a la identificación de sustancias. Estas propiedades explícitas e implícitas son consideradas principios propios de una sustancia, de tal manera que la presencia de estos principios se considera como evidencia de la presencia de una sustancia (Ngai et al., 2014). Este tipo de razonamiento se asocia curricularmente a los últimos años de educación básica (Liu y Lesniak, 2006; Stevens et al., 2010; Hadenfledt et al., 2014, Talanquer, 2020), aunque como en el caso del objetivismo tiene una alta persistencia en estudiantes en niveles superiores (Wiser et al., 2012). Al progresar al pensamiento principista, los estudiantes amplían la cantidad de propiedades o principios, lo que les permite identificar las sustancias con mayor precisión. Sin embargo, considerar que las propiedades características de una sustancia se mantienen, independientemente de la proporción en la que se encuentren, las interacciones con otras sustancias, o de los cambios en las condiciones del sistema, puede dificultar la comprensión de fenómenos asociados, por ejemplo, a la contaminación o a los efectos del cambio climático.

Los estudiantes progresan al pensamiento *composicionista* al dejar de representarse el material como un todo, y reconocer que éste puede estar compuesto de varias sustancias formando una mezcla (Ngai et al., 2014). La relación entre composición y propiedad se hace más sofisticada, dado que se admite la posible presencia de varios componentes en el material, cada uno de los cuales tiene sus propiedades características. En el composicionismo, los instrumentos y técnicas experimentales son útiles no sólo para determinar las propiedades de un material o sustancia, sino también para separar e identificar sus componentes, y para determinar la proporción en la que se encuentran (Sevian et al., 2015). Este tipo de razonamiento se asocia curricularmente a los cursos terminales de educación básica, y cursos iniciales de la educación secundaria (Liu y Lesniak, 2005; Stevens et al., 2010; Hadenfeldt et al., 2014, Talanquer, 2020), pero en la literatura se ha reportado que este tipo de razonamiento es poco frecuente en estudiantes de educación secundaria y superior (Wiser et al., 2012). Aun cuando el composicionismo constituye un avance importante respecto del objetivismo y el principismo, los estudiantes siguen en un marco descriptivo de la relación composición – propiedad, lo que les dificulta predecir y explicar las propiedades de las mezclas considerando las propiedades de las sustancias puras que las componen, y la proporción en la que se encuentran.

Finalmente, los estudiantes progresan al pensamiento *interaccionista* al reconocer que los diversos componentes de un material pueden interactuar entre ellos de diversas maneras, y que esas interacciones son las que determinan sus propiedades (Ngai et al., 2014). El interaccionismo permite a los estudiantes acceder a un amplísimo repertorio de nuevas posibilidades, dada su naturaleza explicativa y predictiva. La caracterización de los diferentes tipos de mezclas que pueden formarse – homogéneas y heterogéneas, con componentes en diversos estados físicos -, permite comprender la naturaleza de la mayoría de los materiales que nos rodean y sus propiedades. El razonamiento interaccionista se asocia curricularmente al término de la escolaridad obligatoria, es decir, constituye el nivel de sofisticación que se espera que todos los ciudadanos puedan alcanzar al término de la trayectoria escolar (Hadenfeldt et al., 2014, Talanquer, 2020). Sin embargo, en la literatura se han reportado las dificultades de la mayoría de los estudiantes para alcanzarlo debido a la complejidad del marco explicativo involucrado, y también a la escasa relevancia que los ciudadanos le atribuyen a este marco (Wei, 2019; Wiser et al., 2012).

Dimensión 2: Las ideas clave sobre las sustancias

Los modelos científicos escolares pueden ser caracterizados también a partir del conjunto de ideas básicas, fundamentales e irreductibles que las ciencias han establecido para pensar sobre los diferentes tipos de fenómenos que constituyen los ámbitos de aplicación del modelo (Izquierdo y Adúriz-Bravo, 2005). Estas ideas son consideradas por los autores como las *reglas del juego* que permiten reconstruir teóricamente los fenómenos estudiados. Estas ideas tienen una alta carga teórica, y son seleccionadas en el contexto de la ciencia escolar en la medida en que permiten aproximarse a una amplia variedad de fenómenos considerados de relevancia personal y social.

Diversos autores han propuesto ideas clave para el modelo de sustancia, la mayoría de ellas derivadas de los principios de la Teoría Cinético Corpuscular de la Materia, orientados a la interpretación de cambios físicos y químicos (De Vos y Verdonk, 1996; Stern y Ahlgren, 2002; Wiser y Smith, 2008). Estas ideas clave refieren a la naturaleza particulada de la

materia, su movimiento y sus interacciones, situando el modelo de sustancia en el nivel submicroscópico (Moltó et al., 2020). Sin embargo, estos trabajos han prestado poca atención a los aspectos macroscópicos del modelo de sustancia. El análisis inferencial realizado en el contexto de trabajos previos (Marzabal et al., 2021), y su articulación con referencias encontradas en la literatura al respecto (Furió-Mas y Domínguez-Sales, 2007; Brown et al., 2002; Stains y Talanquer, 2007, Atkins et al., 2014, Talanquer, 2020), permiten identificar ideas clave para el modelo de sustancia asociadas a la composición, y a las propiedades de las sustancias. A continuación, presentamos las ideas clave asociadas al modelo de sustancia, diferenciando las ideas relativas a la composición (C), y las ideas relativas a las propiedades (P):

| | |
|-----|--|
| C.1 | Los objetos, productos o materiales están constituidos por sustancias |
| C.2 | La materia está formada generalmente por mezclas de sustancias |
| P.1 | Las sustancias tienen propiedades intensivas que nos permiten identificarlas |
| P.2 | Las propiedades y comportamiento de las mezclas responden a las sustancias que lo componen y a su proporción |
| P.3 | Las interacciones entre las sustancias y mezclas determinan sus propiedades y su comportamiento físico y químico |
| P.4 | La organización de las sustancias responde a las interacciones entre ellas |

La principal relevancia del aprendizaje de estas ideas clave asociadas al modelo de sustancia a nivel macroscópico reside en su potencial contribución a la toma de decisiones en situaciones de la vida cotidiana y cuestiones sociocientíficas, y a la superación de actitudes quimiofóbicas (Belenguer-Sapiña, Briz-Redón y Domínguez-Sales, 2021).

Durante la escolaridad se espera que los estudiantes se vayan apropiando progresivamente de estas ideas clave en el orden en que fueron presentadas, y que sean capaces de aplicarlas para construir visiones cada vez más robustas sobre los sistemas materiales. Esto les permitirá ir distinguiendo progresivamente entre materia, sustancia y mezcla, para avanzar después hacia comprensiones más profundas de la naturaleza particulada de la materia, y de los cambios físicos y químicos de las sustancias (Furió-Mas y Domínguez-Sales, 2007).

Dimensión 3: Las representaciones de los sistemas materiales

A partir de las formas de razonamiento y las ideas clave, los estudiantes pueden construir representaciones de los sistemas materiales. Este proceso de reconstrucción teórica de los fenómenos estudiados a partir de las ideas clave y formas de razonamiento asociadas al modelo, permiten visualizar la correspondencia que los estudiantes son capaces de establecer entre la teoría y el fenómeno (Ariza, 2022).

Estas representaciones de los sistemas materiales pueden visualizarse como mapas semánticos cuyos componentes fundamentales son entidades, propiedades, actividades y organización (Russ et al., 2008).

Las *entidades* se refieren a los componentes materiales de un sistema que se considera que existen en el mundo físico, y que son relevantes para la comprensión del fenómeno estudiado. Estas entidades pueden referirse como materiales, sustancias o elementos particulares, como el sodio; o bien referirse a ellos nombrándolos según las categorías a las que pertenecen, como elemento, metal o metal alcalino.

Las *propiedades* se refieren a las cualidades o atributos de las entidades. Hacen referencia entonces a magnitudes explícitas e implícitas que pueden ser determinadas en relación con las entidades, tales como masa, densidad, temperatura o color.

Las *actividades* se refieren a los procesos físicos o químicos experimentados por las entidades como resultado de las interacciones entre ellos, o de la modificación de las condiciones del sistema. Fusión, combustión o ionización son ejemplos de actividades a los que pueden asociarse procesos observados.

Finalmente, la *organización* se refiere a la disposición espacial de las entidades del sistema, es decir, las distancias y posiciones relativas de las diversas entidades del sistema material, y cómo esta organización puede ir cambiando con el tiempo. La organización da cuenta de las actividades, interacciones o procesos que están teniendo lugar entre las entidades del sistema, y determina las propiedades de las entidades.

Durante la escolaridad, se espera que las representaciones de los sistemas materiales vayan progresando, en la medida en que se van incorporando más componentes a la representación, se van estableciendo relaciones más complejas entre ellos, y las representaciones se van alineando con el conocimiento científico vigente (Ngai et al., 2014; Russ et al., 2008; Moreira, Marzábal y Talanquer, 2019).

La integración de las dimensiones del modelo de sustancia para una progresión de aprendizaje multidimensional

Si bien existe en la literatura al menos una progresión de aprendizaje multidimensional, centrada en las ideas clave y formas de razonar de los estudiantes en torno a las sustancias (Ngai et al., 2014), nuestra propuesta incorpora un aspecto que nos parece muy relevante: las formas en que los estudiantes se representan los sistemas materiales.

La representación de los sistemas materiales permite visualizar el tránsito de los estudiantes del fenómeno al modelo (Sensevy et al., 2008), resguardando la concepción semántica o representacional de los modelos químicos escolares (Ariza, 2022). Desde esta perspectiva semanticista, explorar los procesos de modelización de los estudiantes implica comprender los procesos mediante los cuales los estudiantes interpretan y aplican las ideas clave y formas de razonamiento al reconstruir teóricamente los fenómenos o hechos del mundo (Sensevy et al., 2008), capturando la función representacional de los modelos científicos (Ariza, 2022).

La caracterización del modelo de sustancia expresado por los estudiantes requiere entonces considerar tres dimensiones: las formas de razonamiento, las ideas clave y las representaciones de los sistemas materiales. Su análisis permite anticipar relaciones entre estas tres dimensiones: la presencia de determinados componentes en las representaciones de los sistemas materiales, requiere la integración de ideas clave y formas de razonamiento específicas. Estas relaciones pueden visualizarse mediante una hipótesis de progresión de aprendizaje multidimensional del modelo de sustancia, es decir, una representación de los estados sucesivos por los que, de acuerdo a la literatura, se espera que transcurran los modelos expresados por los estudiantes a medida que evolucionan (Talanquer, 2014).

Aun cuando en los últimos años las progresiones de aprendizaje han constituido una línea de investigación muy productiva, y con un enorme potencial para orientar el diseño de currículos escolares y los procesos de enseñanza aprendizaje en el contexto escolar (Salinas et al., 2013), la evidencia sugiere que los estudiantes no progresan en

las trayectorias definidas teóricamente, lo que hace necesario refinarlas empíricamente (Pierson, Clark y Sherard, 2017). En este artículo nuestro objetivo es entonces caracterizar el progreso de las formas de razonamiento, ideas clave y representaciones asociadas a los sistemas materiales de estudiantes en edad escolar, para la construcción de una progresión de aprendizaje multidimensional para el modelo de sustancia refinada empíricamente (Krajcic y Shin, 2023).

Metodología

Contexto y participantes

Esta investigación se basó en el análisis de respuestas a una actividad, proporcionadas por 343 estudiantes (203 mujeres y 140 hombres), entre los 13 y los 18 años de edad. Los participantes asistían a 12 establecimientos educativos de Chile, de los cuales 5 eran escuelas públicas, 5 eran escuelas particulares subvencionadas y 2 eran escuelas privadas. Los datos se recolectaron durante el año escolar, y no estuvieron asociadas a una unidad del currículo de Química o a una temática en particular. Todos los participantes fueron informados de que su participación era voluntaria y no tenía consecuencias en su evaluación, y dieron su consentimiento para participar en este estudio. Dado que los estudiantes eran menores de edad, sus tutores legales también dieron su consentimiento.

Instrumento de recogida de datos

El instrumento de recogida de datos para esta investigación consistió en una actividad situada en un escenario hipotético en que los estudiantes debían comprobar la presencia de una determinada sustancia en un producto comercial. El instrumento fue diseñado a partir de ítems del *Chemical Substance Inventory* (Ngai y Sevian, 2016), adaptando una pregunta de tipo comprobación, es decir, asociada a cómo se sabe o cómo se ha llegado a conocer o a hacer una determinada afirmación. La actividad se situó en un contexto de relevancia personal y social asociado a la pandemia de COVID-19: la posible adulteración del alcohol gel, usado comúnmente como desinfectante de manos, fabricado y comercializado sin la inspección del Instituto de Salud Pública de Chile.

La actividad, que mostramos a continuación, pedía a los estudiantes que explicaran por escrito como podrían comprobar la presencia de alcohol en el alcohol gel, y que justificaran por qué les parecía una buena estrategia para comprobarlo.

El uso de alcohol gel con una composición al 70% de alcohol ha sido una de las principales recomendaciones de las autoridades sanitarias para prevenir el coronavirus. Dicho producto es una mezcla de etanol al 96%, glicerol, peróxido de hidrógeno y agua en proporciones definidas para cumplir con las regulaciones sanitarias. Sin embargo, a lo largo del periodo de pandemia se han reportado varios casos de venta de alcohol gel que no cumple con la composición recomendada por el Instituto de Salud Pública (ISP).

Imagina que has adquirido alcohol gel de cuya procedencia no estás seguro.

Recolección de datos

Las respuestas de los estudiantes se recolectaron a través de un formulario online, al inicio de una clase de Química. Los profesores proporcionaron el link al formulario, facilitaron el acceso a los estudiantes y leyeron en conjunto el enunciado de la actividad. Los estudiantes

tuvieron 15 minutos para completar la tarea. El profesor/a no intervino durante ese tiempo, más que para asegurarse de que cada estudiante completara la tarea individualmente. Se recogieron un total de 416 respuestas, de las cuales 343 incluyeron una respuesta completa.

Análisis de datos

La caracterización del progreso del modelo de sustancia de los estudiantes se realizó mediante una estrategia cualitativa interpretativa de análisis (Sandin, 2003) en dos etapas. En la primera etapa se codificaron las respuestas de los estudiantes, considerando cada una de las dimensiones por separado, y en la segunda etapa se identificaron y caracterizaron los estadios de la progresión de aprendizaje.

Durante la primera etapa entonces se codificaron las tres dimensiones que se pretendían integrar para la construcción de una progresión de aprendizaje multidimensional del modelo de sustancia (Krajcik y Shin, 2013): (a) las formas de razonamiento, (b) las ideas clave y (c) las representaciones del sistema material.

En primer lugar, se analizaron las respuestas identificando la forma de razonamiento asociada al modelo de sustancia como categorías excluyentes: objetivista, principista, compositonista o interaccionista (Ngai et al., 2014). Aun cuando las formas de razonamiento fueron establecidas previamente por Ngai, Sevan y Talanquer, fue necesario refinar los descriptores a partir de las respuestas obtenidas, para precisar mejor estas formas de razonamiento, de manera que el proceso de codificación fuera confiable. En la Tabla 1 se recoge el esquema de códigos y sus respectivos descriptores.

| Forma de razonamiento | Descriptor |
|-----------------------|---|
| Objetivismo | El estudiante usa la apariencia de la sustancia o material para identificarla, aplicando una o más propiedades perceptibles como criterio de identificación. |
| Principismo | Una o más propiedades son consideradas por el estudiante como atributos característicos o principios propios de la sustancia, de tal manera que estas propiedades explícitas e implícitas se consideran como criterios de identificación. |
| Composicionismo | El estudiante reconoce que las propiedades de los materiales o mezclas pueden ser distintas de las propiedades de las sustancias que las componen. |
| Interaccionismo | El estudiante reconoce que los diversos componentes de una sustancia o material pueden interactuar entre ellos de diversas maneras, y que esas interacciones son las que determinan sus propiedades. |

TABLA 1. Esquema de códigos para el razonamiento del modelo de sustancia (Ngai et al., 2014).

En segundo lugar, se identificaron las ideas clave subyacentes a las respuestas de cada estudiante. Aun cuando las ideas clave emergieron del análisis inferencial de propuestas previas, en este caso también fue necesario un proceso iterativo de refinamiento entre las ideas clave, y las evidencias de estas ideas presentes en las respuestas de los estudiantes (Brown et al., 2002; Stains y Talanquer, 2007; Atkins et al., 2014; Talanquer, 2020). Los códigos a los que llegamos, que se presentan en la Tabla 2, se aplicaron como categorías no excluyentes, de manera que la respuesta de un estudiante podía contener una o varias de estas ideas clave, tanto asociadas a la composición como asociadas a las propiedades.

| Ideas clave del modelo de sustancia | Evidencias de la presencia de estas ideas clave en las respuestas |
|--|--|
| C.1 Los objetos, productos o materiales están constituidos por sustancias | Se identifica al menos una de las sustancias que constituyen un objeto, producto o material. |
| C.2 La materia está formada generalmente por mezclas de sustancias | Se reconoce la presencia de varias sustancias en un objeto, producto o material. |
| P.1 Las sustancias tienen propiedades intensivas que nos permiten identificarlas | Se hace referencia a características, atributos o propiedades que se asumen como propias de una sustancia, y se aplican como criterios para identificarla o distinguirla de otras. |
| P.2 Las propiedades y comportamiento de las mezclas responden a las sustancias que lo componen y a su proporción | Se establece una relación entre las propiedades de una mezcla y las propiedades de las sustancias que lo componen, considerando la proporción en la que se encuentran. |
| P.3 Las interacciones entre las sustancias y mezclas determinan sus propiedades y su comportamiento físico y químico | Se atribuyen las propiedades y/o el comportamiento de las sustancias a las interacciones entre sus componentes, ya sea a nivel macroscópico (reactividad, polaridad) o submicroscópico (fuerzas inter e intramoleculares). |
| P.4 La organización de las sustancias responden a las interacciones entre ellas | Se asocia la estructura de una sustancia a las interacciones entre sus componentes, ya sea a nivel macroscópico (mezcla homogénea o heterogénea) o submicroscópico (geometría molecular). |

TABLA 2. Esquema de códigos para las ideas clave del modelo de sustancia (Brown et al., 2002; Stains y Talanquer, 2007; Atkins et al., 2014; Talanquer, 2020).

Finalmente, los componentes de las representaciones de los estudiantes se caracterizaron mediante la construcción de mapas semánticos que representan los componentes del modelo químico escolar presentes en las respuestas de los estudiantes (Marzábal et al., 2021). Para la construcción de los mapas semánticos, se representaron los componentes del modelo (Tabla 3) mediante términos dentro de elipses, cuyo color indicaba el tipo de componente. Los componentes se representaron con el siguiente código de colores: las entidades en verde, las propiedades en azul, las actividades en naranja y la organización en amarillo.

| Componente | Descriptor | Mapa semántico |
|--------------|--|---|
| Entidad | Componente material presente en el sistema físico, y relevante para explicar el fenómeno estudiado |  |
| Propiedad | Cualidades o atributos de las entidades. Hacen referencia a magnitudes que, ya sea en forma cualitativa o cuantitativa, pueden ser determinadas en relación con las entidades. |  |
| Actividad | Procesos físicos y químicos experimentados por los componentes materiales de un sistema como resultado de las interacciones entre ellos, o de la modificación de las condiciones del sistema. |  |
| Organización | Disposición espacial de las entidades del sistema, y cómo esta organización puede ir cambiando en el tiempo. Esta organización responde a las propiedades de las entidades, y da cuenta de las actividades (interacciones o procesos) que están teniendo lugar a nivel macroscópico o submicroscópico. |  |

TABLA 3. Esquema de códigos asociados a los componentes del modelo de sustancia (Adaptado de Marzábal et al., 2021).

Para resguardar la confiabilidad de los resultados, los tres esquemas de códigos se refinaron a través del juicio de expertos, y todas las producciones de los estudiantes fueron codificadas de manera independiente por dos de los autores de este artículo. Para evaluar la concordancia se aplicó el Índice de Kappa. El valor obtenido en la codificación de las respuestas de los estudiantes fue de 0'86, lo que puede considerarse un nivel de concordancia sustantivo (Taber, 2018).

En la segunda etapa del análisis, se identificaron los estadios de la progresión de aprendizaje a partir del análisis integrado de los códigos asignados a cada una de las dimensiones. Para ello, se agruparon todas las respuestas asociadas a la misma forma de razonamiento, y se evaluó la equivalencia de su nivel de sofisticación, considerando las ideas clave asociadas y los componentes del modelo de sustancia. En los casos en que todas las respuestas fueron consideradas equivalentes, se asoció solamente un estadio a esa forma de razonamiento. En cambio, en los casos en que había diferencias en el nivel de sofisticación de las respuestas asociadas a la misma forma de razonamiento, se identificaron varios estadios que diferían en las ideas clave subyacentes y/o en los componentes de los modelos. Este proceso se realizó de manera iterativa, hasta llegar a un punto de saturación en el que todas las respuestas asociadas a cada estadio fueron consideradas equivalentes en su nivel de sofisticación, dado que las representaciones de los estudiantes, aun mostrando ligeras variaciones entre sí, podían asociarse a las mismas formas de razonamiento e ideas clave. Esto permitió, a su vez, determinar la cantidad de respuestas que podían asociarse a cada uno de los estadios identificados.

Este proceso de diseño, evaluación y revisión puede ser considerado como una validación empírica de la progresión de aprendizaje multidimensional del modelo sustancia (Krajcik y Shin, 2023).

Resultados y discusión

El análisis de las respuestas de los estudiantes a la tarea propuesta nos llevó a identificar 6 estadios distintos, que constituyen la progresión de aprendizaje multidimensional del modelo de sustancia (Figura 3). A continuación, proporcionamos una caracterización más detallada de cada una de ellas.

Estadio 1: Objetivista

En este primer estadio se sitúan las respuestas con un menor nivel de sofisticación (27%).

Las producciones escritas de los estudiantes hacen referencia al alcohol sin considerar que es parte de una mezcla o de un producto comercial, y basan su identificación en sus propiedades perceptibles, tal y como puede verse en el ejemplo:

"Comprobando el olor, viendo si realmente huele a alcohol o no. El alcohol emite un olor específico que cuando uno lo siente lo reconoce como tal" [S_09].



En las respuestas analizadas, los estudiantes invocan una, dos y hasta tres propiedades perceptibles del alcohol, donde el olor aparece de manera más recurrente, seguida de su consistencia, color o la sensación del alcohol en contacto con la piel.

En las representaciones del sistema material aparece entonces una sola entidad, y una o varias propiedades explícitas de esta identidad (Marzabal et al., 2021). Esto nos permite inferir que en este estadio se invocan dos ideas clave: los estudiantes asocian una sustancia al producto, y basan su identificación en una propiedad perceptible, que consideran característica (Stains y Talanquer, 2007). Dado que las propiedades que se refieren tienen origen sensorial, podemos asociar las respuestas a un tipo de razonamiento objetivista (Ngai et al., 2014).

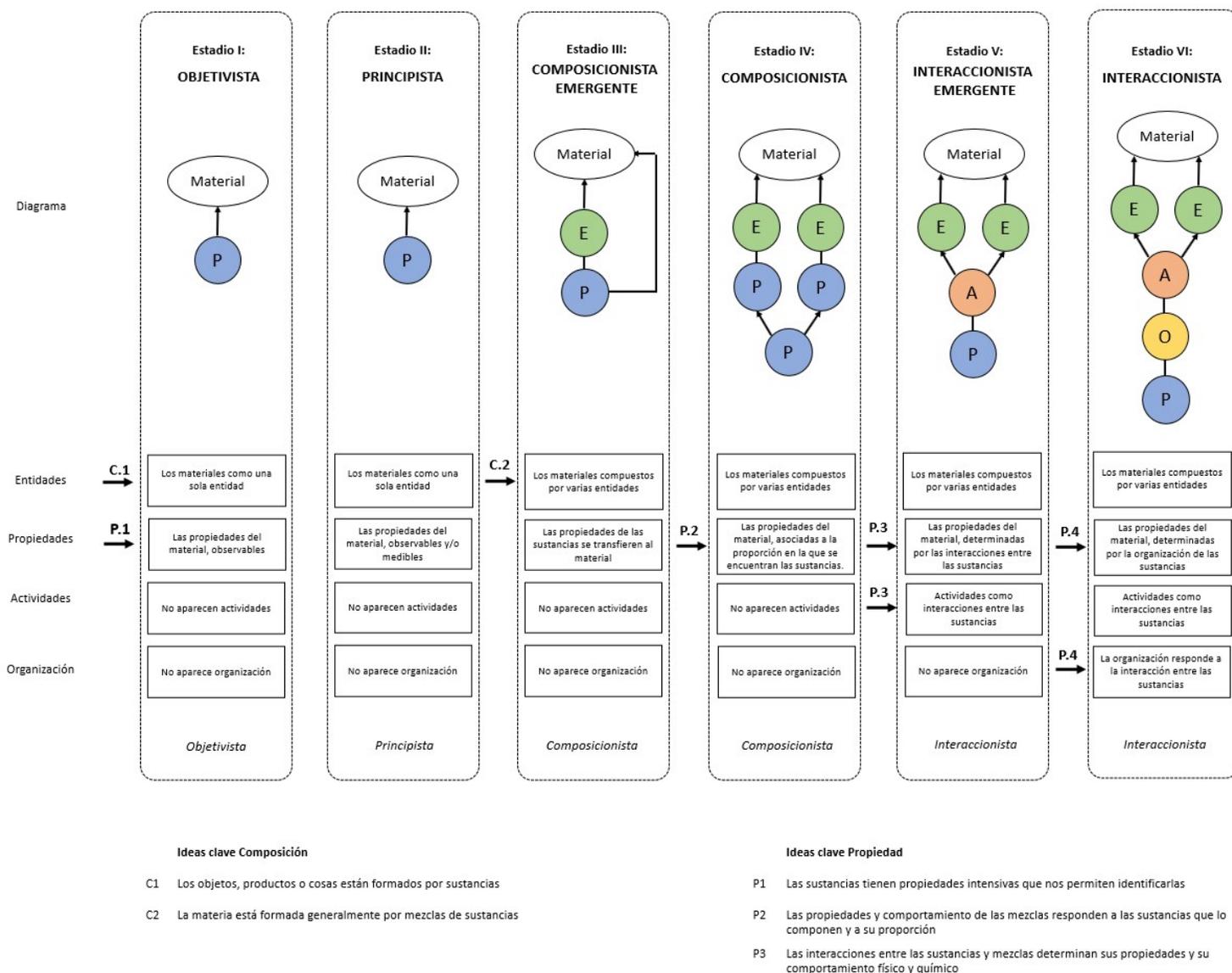


FIGURA 3. Progresión de aprendizaje multidimensional del modelo de sustancia.

Estadio 2: Principista

En este segundo estadio, las respuestas muestran un nivel de sofisticación mayor, en la medida en que refieren a las propiedades y el comportamiento del alcohol como estrategias para comprobar su presencia más allá de su apariencia (32%). En las respuestas analizadas,

los estudiantes invocan las propiedades o el comportamiento del alcohol, tal y como puede verse en el ejemplo:

“Lo expondría a altas temperaturas. Por el hecho de que el alcohol es inflamable y al ser expuesto al calor este se prenderá en fuego”

[S_326]



La volatilidad y la inflamabilidad del alcohol son las propiedades que aparecen de manera más frecuente, aunque los estudiantes no siempre se refieren explícitamente a cómo estas propiedades podrían ser determinadas.

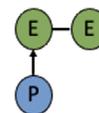
En cuanto a los componentes del modelo que aparecen en la representación del sistema material, aparece una sola entidad, y una o varias propiedades asociadas a esta entidad. En este estadio se activan las mismas ideas clave que en el estadio anterior: los estudiantes identifican una de las sustancias que constituye el producto, y refieren una o varias propiedades como criterios para comprobar su presencia.

Aun cuando los mapas semánticos e ideas clave sean coincidentes, la naturaleza implícita de las propiedades invocadas constituye un avance significativo respecto del estadio anterior, que permite evidenciar el progreso hacia el razonamiento principista.

Estadio 3: Compositorista emergente

En el tercer estadio, las respuestas de los estudiantes consideran la presencia de varias sustancias en el producto comercial, y se refieren a las propiedades de aquella que se quiere identificar (27%). En las respuestas analizadas los estudiantes invocan propiedades explícitas e implícitas del alcohol, reconociéndolo como componente del alcohol gel, tal y como puede verse en el ejemplo:

“Verificando si es inflamable o no. Porque hay algunos alcohol gel que su componente principal es alcohol etílico, y eso hace que sus vapores sean inflamables” [S_173]



La apariencia, volatilidad e inflamabilidad del alcohol siguen siendo las propiedades que aparecen de manera más frecuente, pero en este caso aparecen referencias a varias entidades, ya sea el alcohol y el alcohol gel, o bien los otros componentes del producto que aparecen en el enunciado de la actividad.

En este estadio, el reconocimiento del producto comercial como una mezcla se refleja en el mapa semántico, en la presencia de más de una entidad, una de las cuales está asociada a una o varias propiedades explícitas e implícitas (Marzábal et al., 2021).

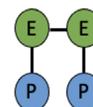
Las estrategias de comprobación de la identidad química del alcohol, en este caso, se basan en tres ideas clave: ahora los estudiantes reconocen la presencia de más de una sustancia en el sistema material, y continúan refiriendo una o varias propiedades como criterios para comprobar la presencia de una de ellas (Atkins et al., 2014). El reconocimiento de la presencia de varias sustancias en el sistema material, apunta a una transición hacia el razonamiento compositorista (Ngai et al., 2014). Sin embargo, esta forma de razonamiento no está todavía consolidada, dado que las respuestas en este estadio no contrastan las

propiedades de la mezcla con las propiedades de las sustancias que lo constituyen, ni se refieren a cómo la proporción en que se encuentran podría incidir en estas propiedades.

Estadio 4: Compositorista

En el cuarto estadio, las respuestas de los estudiantes reconocen la presencia de otras sustancias presentes en el sistema material, y asumen que las propiedades de la mezcla dependen de la proporción en la que se encuentren sus componentes (10%). En las respuestas analizadas, los estudiantes invocan propiedades, pero ahora se refieren al alcohol gel, y no solamente al alcohol, tal y como puede verse en el ejemplo a continuación:

“Tendríamos que encenderle fuego al alcohol gel para ver qué tan inflamable es. Entre más inflamable sea, más alcohol debería tener” [S_14]



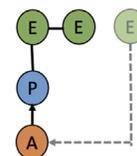
Nuevamente, la apariencia, volatilidad e inflamabilidad siguen siendo las propiedades que aparecen de manera más frecuente, pero ahora se refieren al alcohol gel, y se asocian a la proporción de alcohol que podría contener.

La consolidación del pensamiento compositorista se refleja en la presencia de varias entidades, y la distinción entre las propiedades de estas entidades y las propiedades de la mezcla en la que se encuentran presentes (Marzábal et al., 2021). Las estrategias de comprobación ya no se refieren solamente a la identidad química del alcohol, sino también a la determinación de la cantidad o la proporción en la que se encuentra presente. Esto evidencia la incorporación de una idea clave nueva, además de las que ya encontrábamos en el estadio anterior: que las propiedades y comportamiento de las mezclas responden a las sustancias que lo componen y a su proporción. Podemos afirmar entonces que en este estadio el razonamiento compositorista ya está consolidado (Ngai et al., 2014).

Estadio 5: Interaccionista emergente

En el quinto estadio, los estudiantes reconocen la presencia de varias sustancias presentes en el sistema material, y asumen que determinadas propiedades o el comportamiento de la mezcla pueden ser atribuidos a las interacciones de la sustancia que se quiere identificar (3%). Los estudiantes se enfocan en las interacciones del alcohol con otros componentes de la mezcla, o con otras sustancias que se aplican como estrategia de comprobación, tal y como puede verse en el ejemplo:

“Lo comprobaría mezclando el alcohol gel con agua. Si el alcohol gel es capaz de disolverse en agua, significaría que hay suficiente alcohol en el producto, debido a que el alcohol tiende a ser polar, característica que dejaría que se disuelva en agua y, por ende, comprobar que está presente en el producto.” [S_21]



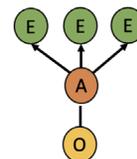
En este estadio aparecen nuevas propiedades: la reactividad y la polaridad del alcohol, sustituyen a la apariencia, volatilidad e inflamabilidad, que eran invocados en los estadios anteriores. Las estrategias de comprobación ya no están asociadas entonces a las

propiedades de la entidad, sino a sus posibles interacciones, que serán determinantes para identificar su identidad química. Estas interacciones aparecen en los mapas semánticos como actividades, que constituyen nuevos componentes de las representaciones de los estudiantes que se incorporan a las entidades y propiedades que habían aparecido hasta ahora (Marzábal et al., 2021). En las respuestas de los estudiantes pueden reconocerse las cuatro ideas clave que aparecían en el estadio anterior, y además una quinta idea clave: la asociación de las interacciones entre las sustancias con su comportamiento físico y químico (Atkins et al., 2014). La incorporación de las interacciones entre las sustancias apunta a un progreso hacia el razonamiento interaccionista (Ngai et al., 2014). Sin embargo, dado que no hay referencias a la organización de las sustancias, consideramos que este tipo de razonamiento no está totalmente consolidado, y por eso nos referimos a este estadio como interaccionista emergente.

Estadio 6: Interaccionista

En el sexto estadio, los estudiantes reconocen la presencia de varias sustancias presentes en el sistema material, asumen que determinadas propiedades o el comportamiento de la mezcla pueden ser atribuidos a las interacciones de la sustancia que se quiere identificar, y pueden asociarlo con la organización de los componentes en el sistema (1%). Los estudiantes se enfocan en las interacciones del alcohol con otros componentes de la mezcla, para inferir la manera en la que se organizan, tal y como puede verse en el ejemplo:

“Comprobar que el alcohol gel tiene una mezcla de alcohol, glicerol y peróxido de hidrógeno: si es capaz de homogenizarse significa que hay mucho alcohol presente en el producto.” [S_101]



En este estadio aparecen la homogeneización como una actividad asociada a los tres componentes del alcohol gel: el alcohol, el glicerol y el peróxido de hidrógeno. La estrategia de comprobación se basa en esta actividad, que determina la organización de los componentes en una mezcla homogénea. En este estadio se incorpora entonces la organización como componente del mapa semántico, de manera que los diagramas pueden contener entidades, propiedades, actividades y organización (Marzábal et al., 2021). En la única respuesta obtenida en este estadio aparece, aunque de forma ambigua, la idea clave de que las sustancias se organizan de una determinada manera, aunque no se explicita la relación entre esta organización y la interacción entre ellas (Talanquer, 2020). Aun así, consideramos que se trata de un estadio con un nivel de sofisticación mayor que los anteriores, con un razonamiento interaccionista más consolidado (Ngai et al., 2014). En este estadio aparecen las seis ideas clave, dado que se incorpora la idea clave correspondiente a la organización de las sustancias a las cinco que ya aparecían en el estadio anterior.

Conclusiones e implicaciones

El objetivo de nuestra investigación fue caracterizar multidimensionalmente el modelo de sustancia invocado por estudiantes escolares en el contexto de una actividad asociada a la comprobación de la presencia de una sustancia en un producto comercial. Nuestro análisis reveló que estudiantes entre los 13 y los 18 años de edad produjeron un amplio rango de respuestas que pueden asociarse a 6 estadios del modelo de sustancia, que van desde

representaciones intuitivas hasta las representaciones que se espera que puedan construir al término de la escolaridad, de acuerdo al currículo vigente (Wei, 2019). Estos estadios corresponden a niveles crecientes de sofisticación del modelo escolar de sustancia, que fueron caracterizados multidimensionalmente a partir de las formas de razonamiento, ideas clave y representaciones de los sistemas materiales.

La integración de las tres dimensiones en la progresión de aprendizaje permitió establecer seis estadios que no hubiera sido posible identificar a partir de la caracterización de una sola de estas dimensiones. Los resultados de este estudio muestran que el progreso de los estudiantes no puede caracterizarse mediante una sola dimensión del modelo, dado que las ideas clave y formas de razonar van avanzando de manera secuencial, dando lugar a representaciones de las sustancias con diferentes niveles de sofisticación. A diferencia de lo que habría sido razonable esperar de acuerdo con la literatura existente (Ngai et al., 2014; Russ et al., 2008; Moreira, Marzábal y Talanquer, 2019), el progreso de un estadio al siguiente, aun cuando involucra nuevas ideas clave y nuevas formas de razonar, no involucra necesariamente la incorporación de nuevos componentes a la representación del sistema material. La progresión, en cambio, puede centrarse en la naturaleza de estos componentes, o en las relaciones que se establecen entre ellas. Estos hallazgos contribuyen a la construcción de marcos más convergentes a partir de las propuestas de trabajos previos en torno a las comprensiones sobre la materia que construyen los estudiantes (Hadenfeldt et al., 2013; Liu y Lesniak, 2006; Merritt y Krajcik, 2013; Moltó et al., 2021; Stevens et al., 2010). Además, refuerzan la necesidad de avanzar hacia conceptualizaciones más complejas de los procesos de aprendizaje de la Química en la escuela (Krajcik y Shin, 2023).

Reconocemos las limitaciones de una progresión de aprendizaje que emerge de una sola actividad, y la necesidad de seguir consolidando esta propuesta a partir de nuevas actividades de distinta naturaleza. Sin embargo, la estrategia de análisis de este estudio podría ayudar a investigadores interesados en las progresiones de aprendizaje de los modelos científicos escolares, así como también a los profesores a tomar decisiones para favorecer procesos de modelización centrados en los aspectos específicos que permiten la transición entre un estadio y el siguiente. Además, la progresión de aprendizaje puede ser aplicada para la anticipación de respuestas asociadas a cada uno de los estadios, para nuevas actividades en el marco del modelo de sustancia.

En cuanto a los modelos de sustancia invocados por los estudiantes participantes, los resultados nos permiten afirmar que en la muestra existe una amplia variedad de modelos de sustancia que se aplican a la comprobación de la presencia de determinadas sustancias en un material, en las que predominan el objetivismo, el principismo y el composicionismo emergente. La prevalencia de estas formas de razonamiento e ideas clave ya había sido señalado por varios autores en estudios previos (Hadenfeldt et al., 2013; Moltó et al., 2021; Wisner et al., 2012; Sevan et al., 2015; Wei, 2019), y nuestra investigación confirma que la mayoría de los estudiantes no logran alcanzar los estadios más altos de la progresión de aprendizaje, y que las relaciones que los estudiantes establecen entre la composición y las propiedades de las sustancias son descriptivas y reduccionistas (Stains y Talanquer, 2007; Wisner et al., 2012). A pesar de las múltiples oportunidades que ofrece el currículo escolar de Química para consolidar el razonamiento composicionista y avanzar hacia el interaccionismo, son muy escasas las respuestas que presentan estos conocimientos científicos más sofisticados, al menos de manera espontánea (Hadenfeldt et al., 2014).

Esto tiene importantes consecuencias para el ejercicio de la ciudadanía tanto en contextos de autocuidado como para la sustentabilidad, dado que las decisiones de consumo y de manipulación de las sustancias de uso cotidiano, basadas en ideas químicas ingenuas, pueden llevar a conductas de riesgo tanto para la salud como para el medio ambiente (Cooper y Stowe, 2018; Mahaffy et al., 2019).

Esto confirma la necesidad de orientar de forma mucho más deliberada los procesos de enseñanza y aprendizaje de la Química escolar hacia el desarrollo de las ideas clave y formas de razonamiento asociadas a estos estadios. Avanzar hacia visiones sofisticadas sobre las sustancias, sus propiedades, su comportamiento físico y químico y sus posibles aplicaciones, requiere alcanzar el razonamiento interaccionista. Los estudiantes deben participar en el análisis y discusión en torno a las interacciones entre las especies químicas, y las implicaciones de estas interacciones en su organización y en sus propiedades. Una vez que se desarrolle esta comprensión, las inferencias para la selección de productos de consumo, el uso de materiales o la participación en controversias socio científicas asociadas a los efectos de las sustancias en la salud y el medio ambiente debieran llevar a una toma de decisiones más informadas.

La relevancia de estas decisiones, considerando las demandas que el ejercicio de la ciudadanía demanda en la sociedad actual (Parga-Lozano y Piñeros-Carranza, 2018; OCDE, 2019), hace necesario evaluar la pertinencia de los currículos de Química. Esto requerirá preguntarnos, por ejemplo, si es razonable esperar que todos los ciudadanos sean capaces de representar la naturaleza, comportamiento y organización de las sustancias y materiales a nivel submicroscópico, y si vale la pena dedicar la mayor parte del currículo escolar de Química a la construcción de un modelo de sustancia submicroscópico. Especialmente considerando el bajo nivel de aplicabilidad de estas ideas en contextos de Química ciudadana, tal y como hemos mostrado en este estudio. Responder a estas preguntas no es sencillo, pero nos parece altamente relevante y urgente para avanzar hacia una Química Escolar Ciudadana que contribuya auténticamente a la alfabetización científica de los estudiantes.

Agradecimiento: Producto científico derivado del Proyecto FONDECYT REGULAR 1190843 financiados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID).

Bibliografía

- Adúriz-Bravo, A., e Izquierdo-Aymerich, M. (2009). Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*, (ESP), 40-49.
- Ariza, Y. (2022). La noción de "modelo teórico" en la enseñanza de la química: representación y función del sistema periódico. *Educación química*, 33(4), 97-110.
- Atkins, P. W., y de Paula, J. (2014). *Atkins' physical chemistry*. Oxford University press.
- Belenguer-Sapiña, C.; Briz-Redón, Á.; Domínguez-Sales, M. C. (2021). Do Social Chemophobic Attitudes Influence the Opinions of Secondary School Students? *J. Chem. Educ.*, 98, 2176. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01352>.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., y Burdige, J. R. (2002). *Chemistry: the central science*. Pearson Educación.

- Chiu, M. H., y Lin, J. W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 1-11.
- Cooper, M. M., y Stowe, R. L. (2018). Chemistry education research—From personal empiricism to evidence, theory, and informed practice. *Chemical reviews*, 118(12), 6053-6087.
- Furió-Mas, C., y Domínguez-Sales, C. (2007). Problemas históricos y dificultades de los estudiantes en la conceptualización de sustancia compuesto químico. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 25(2), 241-258.
- Hadenfeldt, J. C., Bernholt, S., Liu, X., Neumann, K., y Parchmann, I. (2013). Using ordered multiple-choice items to assess students' understanding of the structure and composition of matter. *Journal of Chemical Education*, 90(12), 1602-1608.
- Izquierdo i Aymerich, M., y Adúriz-Bravo, A. (2005). Los modelos teóricos para la ciencia escolar: Un ejemplo de química. *Enseñanza de las Ciencias*, (Extra).
- Krajcik, J., y Shin, N. (2023). Student Conceptions, Conceptual Change, and Learning Progressions. *Handbook of Research on Science Education: Volume III*.
- Liu, X., y Lesniak, K. (2006). Progression in children's understanding of the matter concept from elementary to high school. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 43(3), 320-347.
- Mahaffy, P. G., Matlin, S. A., Holme, T. A., y MacKellar, J. (2019). Systems thinking for education about the molecular basis of sustainability. *Nature Sustainability*, 2(5), 362-370.
- Marzábal, A., Delgado, V., Moreira, P., Merino, C., Cabello, V. M., Manrique, F., Soto, M., Cuellar, L. y Izquierdo, D. (2021). Los modelos materia, reacción química y termodinámica como núcleos estructurantes de una química escolar orientada a la formación ciudadana. *Educación química*, 32(4), 109-126.
- Merritt, J., y Krajcik, J. (2013). Learning progression developed to support students in building a particle model of matter. *Concepts of matter in science education*, 11-45.
- Moltó, M. Á., Hernández, M. I., y Pintó, R. (2021). Una herramienta para el análisis del nivel de comprensión del modelo de materia de los alumnos de 4º de ESO. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1).
- Moreira, P., Marzabal, A., y Talanquer, V. (2019). Using a mechanistic framework to characterise chemistry students' reasoning in written explanations. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(1), 120-131.
- Ngai, C., y Sevian, H. (2017). Capturing chemical identity thinking. *Journal of Chemical Education*, 94(2), 137-148.
- Ngai, C., Sevian, H., y Talanquer, V. (2014). What is this substance? What makes it different? Mapping progression in students' assumptions about chemical identity. *International Journal of Science Education*, 36(14), 2438-2461.

- Oh, P. S., y Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
- Pierson, A. E., Clark, D. B., y Sherard, M. K. (2017). Learning progressions in context: Tensions and insights from a semester-long middle school modeling curriculum. *Science Education*, 101(6), 1061-1088.
- Raviolo, A., Garritz, A., y Sosa, P. (2011). Sustancia y reacción química como conceptos centrales en química. Una discusión conceptual, histórica y didáctica.
- Russ, R. S., Coffey, J. E., Hammer, D., y Hutchison, P. (2009). Making classroom assessment more accountable to scientific reasoning: A case for attending to mechanistic thinking. *Science Education*, 93(5), 875-891.
- Salinas, I., Covitt, B. A., y Gunckel, K. L. (2013). Sustancias en el agua: progresiones de aprendizaje para diseñar intervenciones curriculares. *Educación química*, 24(4), 391-398.
- Sandín M. P., (2003), Investigación cualitativa en educación: fundamentos y tradiciones, Madrid, España: Mc Graw Hill.
- Sensevy, G., Tiberghien, A., Santini, J., Laubé, S., y Griggs, P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science education*, 92(3), 424-446.
- Sevian, H., Ngai, C., Szeinberg, G., Brenes, P., y Arce, H. (2015). Concepción de la identidad química en estudiantes y profesores de química: Parte I-La identidad química como base del concepto macroscópico de sustancia. *Educación química*, 26(1), 13-20.
- Soto, M., y Couso, D. (2023). Construcción de un modelo sofisticado de energía en futuros docentes de física. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 41(2), 25-45.
- Stains, M., y Talanquer, V. (2007). Classification of chemical substances using particulate representations of matter: An analysis of student thinking. *International Journal of Science Education*, 29(5), 643-661.
- Stern, L., y Ahlgren, A. (2002). Analysis of students' assessments in middle school curriculum materials: Aiming precisely at benchmarks and standards. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(9), 889-910.
- Stevens, S., Delgado, C. and Krajcik, J. S., (2010) Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter, *Journal of Research in Science Teaching*, 47, 687-715.
- Taber, K. S. (2018). The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Res. Sci. Educ.* 48(6), 1273-1296. [doi:10.1007/s11165-016-9602-2](https://doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2)
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, 31(15), 2123-2136.

- Talanquer, V. (2016). Central ideas in chemistry: An alternative perspective. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 3-8.
- Talanquer, V. (2018). Progressions in reasoning about structure–property relationships. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(4), 998-1009.
- Talanquer, V. (2020). La progresión de los aprendizajes sobre la composición, estructura y transformación química de la materia. *Educació química*, 4-11.
- De Vos, W., y Verdonk, A. H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 33(6), 657-664.
- Wei, B. (2019). Reconstructing a school chemistry curriculum in the era of core competencies: A case from China. *Journal of Chemical Education*, 96(7), 1359-1366.
- Wiser, M., Smith, C. L., y Doubler, S. (2012). Learning progressions as tools for curriculum development: Lessons from the Inquiry Project. In *Learning progressions in science* (pp. 357–403). Brill Sense.