

# Concepción de la identidad química en estudiantes y profesores de química: Parte I – La identidad química como base del concepto macroscópico de sustancia

Hannah Sevian,<sup>1\*</sup> Courtney Ngai,<sup>1</sup> Gabriela Szeinberg,<sup>2</sup> Paula Brenes<sup>3</sup> y Heilen Arce<sup>3</sup>

## **ABSTRACT (Chemistry students' and professors' conceptions of chemical identity: Part I – Chemical identity as the basis of the macroscopic concept of substance)**

The value of the concept of substance, both in its theoretical and phenomenological constructions, should be considered in the learning of chemistry. The central idea of chemical identity is defined to consist of the assumptions, knowledge and practices of chemists in determining whether substances are the same or not the same. Within a collaboration between two universities, one in Costa Rica and the other in the United States, an exploratory study was conducted to uncover trends and to validate empirically, within undergraduate and graduate levels of education, including professors, a hypothetical learning progression of chemical identity that was previously reported. This work is presented in two parts. In this first part, a brief history of the macroscopic concept of substance is presented, as well as a summary of the hypothetical learning progression of chemical identity and how it relates to the theoretical framework of chemical thinking. This manuscript precedes the second part in which the results, implications and conclusions are presented.

**KEYWORDS:** learning progressions, alternative conceptions, concept of substance, chemistry

## **Resumen**

El valor del concepto de sustancia, tanto como construcción teórica y fenomenológica como macroscópica, debe ser considerado en el aprendizaje de la química. Este trabajo define una idea principal en química —identidad química— que consiste en las sugerencias, conocimientos y prácticas de trabajo de los químicos para saber si las sustancias químicas son diferentes o iguales entre sí. Dentro de una colaboración entre una universidad en los Estados Unidos y otra en Costa Rica, fue conducida una investigación exploratoria para descubrir tendencias y validar empíricamente una progresión de aprendizaje hipotética sobre la identidad química, que fue reportada anteriormente, para alumnos y profesores de pregrado y postgrado. Este trabajo es presentado a través de dos documentos. En el primero, a continuación, se presenta una breve historia del concepto macroscópico de sustancia, un resumen de la progresión de aprendizaje hipotética, y cómo se ubica dentro del marco teórico del pensamiento químico. Este manuscrito conduce al segundo trabajo en el que se presentan el marco analítico, y los resultados, implicaciones y conclusiones.

**Palabras clave:** progresiones de aprendizaje, concepciones alternativas, concepto de sustancia, currículo de química

## **Introducción**

Todas las ciencias tienen como objetivo la diferenciación entre entidades pertinentes y, posteriormente su clasificación en grupos distintos, lo cual brinda a los científicos una estra-

tegia importante en la práctica de su disciplina. Clasificar sirve en la química no solamente como herramienta útil para organizar, sino que también permite a los químicos predecir las propiedades de la materia. La disciplina de la química tiene como base una idea fundamental: la de sustancia como concepto teórico, ideal y submicroscópico. La sustancia es únicamente especificada por su fórmula y estructura, según la regla de Butlerov (1971, p. 290, traducción): La naturaleza química de una molécula compuesta depende de la naturaleza y la cantidad de sus constituyentes elementales y de su estructura química. Sin embargo, la materia no es ideal. Toda la materia que se encuentra en el mundo, consiste en mezclas de sustancias ideales. Pero la pureza es una idea

<sup>1</sup> Department of Chemistry, University of Massachusetts Boston, 100 Morrissey Blvd., Boston, MA 02125, EUA; e-mail: hannah.sevian@umb.edu

<sup>2</sup> Department of Chemistry, Washington University in St. Louis, 1 Brookings Drive, St. Louis, MO 63130, EUA.

<sup>3</sup> Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica, 10101 San Pedro De Montes de Oca, San José, Costa Rica.

**Fecha de recepción:** 4 de junio de 2014.

**Fecha de aceptación:** 2 de septiembre de 2014.

teórica. Actualmente la pureza de un material<sup>1</sup> se determina de forma gradual, es decir considerando el límite tolerable de impurezas. Además, una sustancia individual no siempre se ve constituida de las mismas partes. Hoffmann (1995) da el siguiente ejemplo: si se tienen tres isótopos de hidrógeno y de oxígeno respectivamente, en una pequeña cantidad de agua (aproximadamente  $10^{24}$  moléculas), 99,8% de las moléculas son constituidas de manera idéntica por dos átomos de  $^1\text{H}$  y un átomo de  $^{16}\text{O}$ . Sin embargo, al tener una sustancia mucho más compleja, como la hemoglobina, con 2954 carbonos, 4516 hidrógenos, 780 nitrógenos, 806 oxígenos, 12 azufres y 4 hierros por molécula, las probabilidades de encontrar dos moléculas idénticas (con respecto a los isótopos) en una gota de sangre son mínimas. Aun así, dichas diferencias importan solo bajo ciertas circunstancias. Es entonces cuando los conceptos macroscópicos de la sustancia toman importancia, cuando se han determinado las condiciones en las que dichos conceptos son relevantes para un cierto propósito o análisis. Entonces, para practicar la química, es importante aclarar el concepto actual o fenomenológico, es decir macroscópico, de sustancia. Para la enseñanza de la química y para los educadores, también es importante saber cómo se desarrolla el concepto macroscópico de sustancia.

### **El concepto de sustancia en acción: perspectiva macroscópica**

El concepto macroscópico de sustancia no es trivial ya que incluye una descripción fenomenológica, según las interacciones de la sustancia consigo misma y con otras sustancias, en forma tan purificada que no importa que no sea teóricamente pura. Entonces, el enfoque incluye saber los límites de los rasgos de la sustancia. Al usar el concepto de sustancia en la práctica hay que preguntar, por ejemplo: ¿Qué tan pura necesita ser una muestra (un límite de ppm, ppb o ppt de varias impurezas)? ¿Importan los isótopos de diferentes elementos para asegurar la pureza de una sustancia?

En la historia de la química, han existido varias conceptualizaciones de sustancia que han comprendido explicaciones fenomenológicas o macroscópicas. Bachelard (1976) describe que las propiedades de la materia varían según cómo se le vea. Por ejemplo, los colores de una hoja de oro varían según los distintos espesores de la hoja. Entonces las propiedades macroscópicas son fenómenos de la “extensión material”. También menciona que las características de la materia pueden darse por “individualización” (dar propiedades esenciales a las partes ínfimas o elementos de una sustancia), así como se puede dar “cualitativismo”, es decir dar las propiedades a la sustancia como si ésta fuera un todo.

Chang (2011) distingue al ‘composicionismo’ como un ‘sistema de práctica’ que por los últimos siglos ha servido

como conocimiento práctico dominante que es particularmente útil como la forma analítica de saber en la química. Chang (2011, p. 255) describe al composicionismo como una actividad epistémica fundamental “... [involucrando] la descripción de las sustancias químicas, ya sea como elementos o compuestos formados por los elementos”. Argumenta que las actividades de la descomposición (de sustancias en sus elementos constitutivos) y síntesis (de compuestos a partir de elementos) han servido a los químicos como prueba de la premisa fundamental de que los componentes son unidades estables que se conservan a través de reacciones químicas. Esto lleva a los químicos a una actividad central de identificación y seguimiento de sustancias elementales.

A partir de la historia del trabajo de química de Siegfried y colaboradores (por ejemplo: Siegfried, 2002), antes del composicionismo, el sistema dominante de la práctica de los químicos era el ‘principismo’ (Chang, 2011), que sostiene que los principios transforman activamente a las sustancias, las cuales mantienen sus identidades básicas, pero exhiben diferentes propiedades como resultado de los principios concomitantes. En el tipo de sistema del principismo, los químicos prestaban atención a tres actividades (p. 256): “(a) clasificar sustancias de acuerdo a sus propiedades observables, (b) explicar las propiedades de las sustancias en función a los principios, y (c) efectuar transformaciones de sustancias por la aplicación (o exclusión) de principios”.

El pensamiento moderno de la química ha llegado a una definición macroscópica de sustancia en operación como tipos de materia que pueden ser diferenciados, como mínimo, por una característica medible que la hace única y se puede usar para identificar la materia (Enke, 2001). De hecho, el concepto macroscópico de sustancia ha cambiado varias veces a lo largo de la historia de la disciplina (Schummer, 2002). Ya para el principio del siglo XX, en las revistas de química, las sustancias eran caracterizadas por una breve lista de factores: método de preparación, análisis elemental, propiedades físicas como punto de congelación y de ebullición, características visuales, solubilidad en disolventes comunes, y reactividades ejemplares. A mitad del siglo XX, ocurrió un gran cambio al introducirse el análisis espectroscópico. Hoy en día, las sustancias siguen siendo caracterizadas en nuevos artículos en las revistas de química por estos factores, pero la estructura química ahora es considerada, y reportada, como característica importante para diferenciar entre sustancias.

### **La identidad química como base del concepto macroscópico de sustancia**

La química es práctica, es decir, que los químicos no solo explican y predicen fenómenos a partir del uso y desarrollo de modelos científicos, sino que también les concierne resolver problemas que surgen de las necesidades humanas. Estos problemas requieren el diseño de nuevas sustancias o analizar procedimientos y evaluar las consecuencias a nivel social, político, ambiental, de salud y ético. Esto tiene dos implicaciones importantes. Primero, la química es una tecnociencia

<sup>1</sup> En este documento, el uso de “material” significa una muestra de materia que pueda ser sustancia (pura) o mezcla de sustancias. El uso de “materia” se usa como el sustantivo general (en inglés con el significado de “matter”).

que une la búsqueda del conocimiento científico con metas tecnológicas impulsadas por necesidades humanas y condiciones de la sociedad (Chamizo, 2013). Segundo, las expectativas de aprendizaje deben estar relacionadas con las experiencias relevantes del pensamiento en la disciplina. Estas expectativas son guiadas por las siguientes preguntas: ‘¿Qué es lo que podemos saber?’ y también ‘¿Qué es lo que podemos hacer con lo que sabemos?’ (Martínez, Valdés, Talanquer & Chamizo, 2012; Talanquer, 2013).

El pensamiento químico ocurre cuando el conocimiento de la química es relevante para enfrentar problemas. Se define como pensamiento químico todo pensamiento que ocurre cuando una persona aplica conocimiento químico durante la práctica de esta ciencia exacta (Sevian & Talanquer, 2014). Más específicamente es cuando el desarrollo y la aplicación del conocimiento químico y las prácticas químicas se usan con el afán de analizar, sintetizar y transformar materia para propósitos prácticos (pp. 10-11).

Consideremos una situación en la que el concepto macroscópico de sustancia es la cuestión. Un químico puede enfrentarse al problema de determinar si una muestra de agua es “segura” para consumo humano. El químico entiende que “segura” no quiere decir que el agua es 100% pura y además que las impurezas tienen diferentes niveles de riesgo (esto se puede observar en una base de datos sobre toxicología). El químico hace uso de la química al resolver problemas que requieren este conocimiento para afrontarlos. En estos casos un químico se pregunta: 1) ¿Qué tipo de impurezas pueden estar en el agua? 2) ¿Cómo se pueden detectar estas impurezas en el agua? 3) ¿Son lo suficientemente sensibles los métodos de detección para medir el nivel donde la impureza deja de ser segura para consumo humano? 4) ¿Qué tan segura tiene que ser el agua para que se pueda beber? Estas son preguntas en el ejercicio de la química que involucran la aplicación del conocimiento químico, que son parte del concepto general de identidad química. La pregunta 1 es una aplicación del conocimiento químico para determinar la pureza de una muestra de agua, y pertenece a la pregunta esencial, ¿Qué tipo de materia es? (coloquialmente ¿Qué es?). Las preguntas 2 y 3 pertenecen a una segunda pregunta esencial, ¿Qué tipo de propiedades se usan para diferenciar la materia? (más coloquialmente ¿Cómo la diferencio de otras cosas?). La pregunta 4 pertenece a una tercera pregunta esencial, ¿Cuáles son los efectos de usar diferentes tipos de materia? (coloquialmente ¿Cuáles son las consecuencias?). Éstas tres preguntas esenciales pertenecen al concepto general de *identidad química*, que es la búsqueda de identificar sustancias o materiales. La identidad química es un concepto general en la práctica de la química, sin importar si el objetivo es sintetizar nuevas sustancias, analizar materiales o transformar sustancias o materiales para obtener resultados útiles, así como la producción de energía, eliminación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera o la transformación del agua de mar en agua potable.

Además de identidad química, se definen cinco otros conceptos generales del pensamiento químico (Sevian & Talanquer, 2014). El resumen de las seis ideas principales y sus

**Tabla 1.** Las ideas principales y las preguntas esenciales relevantes y conectadas a cada idea del pensamiento químico (adaptado de la figura 2 de Sevian y Talanquer, 2014). Las preguntas esenciales que están en el límite de una idea principal pertenecen a ambas ideas a cada lado de la frontera.

<i>Idea principal</i>	<i>Preguntas esenciales</i>
<b>Identidad química</b> (¿Cómo identificamos sustancias?)	¿Qué tipos de materia hay? ¿Qué aspectos clave se usan para diferenciar entre tipos de materia?
<b>Estructura-propiedades</b> (¿Cómo predecimos las propiedades de la materia?)	¿Cómo surgen las propiedades de la materia? ¿Cómo influye la estructura en la reactividad?
<b>Causalidad</b> (¿Por qué ocurren los procesos químicos?)	¿Qué impulsa el cambio químico? ¿Qué determina los productos del cambio químico?
<b>Mecanismo</b> (¿Cómo ocurren los procesos químicos?)	¿Qué patrones de interacción se establecen? ¿Qué afecta el cambio químico?
<b>Control</b> (¿Cómo controlamos los procesos químicos?)	¿Cómo se puede controlar el cambio químico? ¿Cómo se pueden controlar los efectos?
<b>Beneficios-costos-riesgos</b> (¿Cómo evaluamos los impactos de transformar químicamente a la materia?)	¿Cuáles son los efectos de usar y producir diferentes tipos de materia?*

\* Esta pregunta esencial también tiene relación con el concepto de identidad química.

preguntas esenciales correspondientes se presentan en la tabla 1.

El concepto de la identidad química se relaciona más con las ideas principales de estructura-propiedades y de beneficios-costos-riesgos; entonces, es importante distinguir entre estas ideas. En primer lugar la *identidad química* se aplica cuando se identifica una sustancia o se diferencia entre sustancias, por medio de una propiedad. En cambio, *estructura-propiedades* se aplica cuando la estructura y/o la composición de una sustancia son utilizadas para inferir propiedades, es decir la diferencia radica en el sentido de lógica en el razonamiento. Entonces, las dos ideas están conectadas a la misma pregunta esencial (¿Qué aspectos clave se usan para diferenciar entre tipos de materia?), ya que las dos se relacionan con los aspectos claves elegidos. Por otra parte, la relación *beneficios-costos-riesgos* involucra un análisis, una evaluación y la toma de decisión considerando las ventajas, desventajas o amenazas. Se puede asociar a tipos de sustancias o materiales, por lo tanto se toma en cuenta a la identidad química. Pero al igual que el caso anterior, la dirección lógica puede darse en cualquier sentido. Debido a esto, es difícil dilucidar el pensamiento evaluativo, ya que puede incluir los tres tipos de conceptos de pensamiento químico mencionados —identidad química, estructura-propiedades y beneficios-costos-riesgos. Reconocemos que múltiples ideas principales pueden estar presentes en el

pensamiento químico que estamos estudiando. Sin embargo, el enfoque del presente trabajo se limita a estudiar principalmente el pensamiento de la idea principal de identidad química.

Desde este enfoque, el desarrollo de la idea principal de identidad química con más deliberación debe ser un enfoque crítico para enseñar química, ya que la consideramos una idea fundamental y transdisciplinaria en la práctica de la química. Esta idea no solamente es importante para los químicos profesionales. Los estudiantes que no van a aprender más allá que la química general deben ser capaces de usar el concepto de identidad química para pensar en problemas cotidianos, como cuál material (vidrio o plástico) sería mejor para almacenar diferentes comidas, o qué impurezas podría haber en el agua impura y qué métodos de purificación se necesita para reducir la concentración de las mismas. Se puede suponer que el concepto de identidad química, como los demás conceptos fundamentales de cualquier disciplina, evoluciona a lo largo de la educación de los estudiantes. Por estas razones, se ha presentado recientemente un resumen y análisis crítico de la literatura existente sobre las concepciones alternativas de la identidad química (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014), en el que se presenta una hipótesis de la progresión de aprendizaje de la identidad química desde la educación primaria hasta la conclusión de la universidad. Para desarrollar la comprensión de cómo cambian las concepciones de la idea de identidad química, y cómo las concepciones se relacionan con otras ideas fundamentales de la química, es necesario validar la progresión de aprendizaje y refinarla. Por eso, el objetivo central de esta contribución es mostrar el pensamiento sobre la identidad química en estudiantes de diferentes niveles de educación mientras están haciendo frente a un problema auténtico, i. e., un problema cotidiano en el que es relevante el conocimiento en química.

### **La hipótesis de la progresión de aprendizaje de la identidad química**

Como parte de una progresión de aprendizaje (PA) de pensamiento químico, anteriormente se presentó una hipótesis de una PA de identidad química, derivada de una revisión de literatura y análisis de estudios de comprensión de los estudiantes acerca de las sustancias y materiales químicos (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014). Antes de detallar la PA realizada, se expone brevemente el concepto general de PA. También se hace referencia brevemente al modelo de cognición que forma la perspectiva teórica detrás de nuestra PA en el pensamiento químico, pero para un tratamiento más extenso, se recomienda acudir a un documento separado (Sevian & Talanquer, 2014). El método (justificación teórica de este estudio, el enfoque empírico y marco de análisis) del estudio de una PA de identidad química se describe en la sección de Metodología. Por cuestiones de tiempo, no se mencionan las diferencias en la forma en que los investigadores estudian las progresiones de aprendizaje o los argumentos teóricos de cómo se organizan. Para discusiones más profundas de estos, se recomienda consultar varias obras en la literatura

existente (Duschl, Maeng & Sezen, 2011; Alonzo & Gotwals, 2012; Duncan & Rivet, 2013).

Las PAs se han definido anteriormente en la literatura. Según Corcoran, Mosher y Rogat (2009, p. 15): Las progresiones de aprendizaje en las ciencias son desarrolladas empíricamente y con hipótesis comprobables sobre cómo crece la comprensión y el desarrollo de la capacidad de los estudiantes para usar conceptos y explicaciones científicas básicas y las prácticas científicas relacionadas, y así se vuelven más sofisticadas con el tiempo, con la instrucción adecuada. Estas hipótesis describen las vías que los estudiantes son propensos a seguir para obtener el dominio de los conceptos básicos. Se basan en investigación sobre cómo el aprendizaje de los estudiantes avanza en realidad —en lugar de seleccionar las secuencias de temas y experiencias basados exclusivamente en el análisis lógico del conocimiento disciplinario actual y en experiencias personales durante la enseñanza. Estas hipótesis se prueban empíricamente para asegurar la validez del constructo (¿Describe la secuencia hipotética un camino que la mayoría de los estudiantes han experimentado realmente, al haberse dado la instrucción apropiada?) y en última instancia para evaluar la validez secuencial (¿Produce mejores resultados la instrucción basada en la progresión de aprendizaje para la mayoría de los estudiantes?).

Las PAs se han desarrollado con base en estudios sobre investigación educativa enfocados en las formas en que la gente aprende sobre diversos temas, integrando aspectos pedagógicos y análisis críticos asociados al área de interés. En la actualidad, los investigadores en educación han desarrollado PAs en ciencia, para diferentes tópicos, como por ejemplo, estructura atómica-molecular (Smith *et al.*, 2006; Stevens *et al.*, 2010), propiedades de la materia (Smith *et al.*, 1985), ciclo del carbono (Mohan *et al.*, 2009), fuerza y movimiento (Alonzo & Steedle, 2009), genética (Duncan *et al.*, 2009), la teoría de la evolución (Lehrer & Schauble, 2012) y argumentación científica (Berland & McNeill, 2010). Un número reciente de esta revista fue dedicada a investigaciones de PAs con relación a la química, por ejemplo, los cambios químicos (Johnson, 2013), sustancias en el agua (Salinas, Covitt y Gunckel, 2013), y la conservación de materia y energía (Parker, de los Santos y Anderson, 2013). Una PA normalmente define un ancla superior, especificada como una meta que es esperada por la sociedad y/o los estándares de la educación. También, define un ancla inferior que especifica las ideas con las que los estudiantes se enfrentan a la escolaridad o al espacio temporal en el cuál se define la progresión. La PA especifica niveles intermedios que ocurren entre el ancla inferior y el ancla superior. Las PAs son modelos cognitivos que contienen la promesa de alinear el currículo, la enseñanza, y la evaluación del conocimiento de estudiantes (NRC, 2013).

La presente PA está organizada por patrones de razonamiento desde el ancla inferior hacia el ancla superior (Sevian & Talanquer, 2014). Se asume que el razonamiento depende de las suposiciones subyacentes que facilitan pero también restringen el razonamiento. Estas suposiciones también

limitan el aprendizaje, ya que constituyen las lentes a través de las cuales se interpretan los fenómenos y las ideas. Por ejemplo, la gente suele asumir que los objetos sólidos se mueven en trayectorias continuas y persisten en el tiempo (Spelke y Kinzler, 2007). Esta suposición facilita nuestras predicciones de las trayectorias de objetos en movimiento, como una pelota de fútbol o un camión, y nos permite anticipar dónde reunirse con una pelota de fútbol o en qué dirección moverse para evitar una colisión. Sin embargo, tal suposición ofrece una lente para interpretar modelos de la materia cuando los estudiantes piensan en los electrones como si fueran pequeñas bolas de la materia que se comportan de forma clásica. Por lo tanto, los modelos actuales de la materia son difíciles de comprender. Esta investigación busca develar las suposiciones subyacentes del pensamiento químico.

La hipótesis es que la PA de la identidad química incluye conceptos umbrales entre los patrones de razonamiento (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014), que son transferencias de la manera de percibir la materia y sus propiedades. Cada uno de estos patrones se describe en términos de suposiciones subyacentes. Según la PA hipotética, hay conceptos umbrales que funcionan como señales de 'reconceptualizar' el conocimiento. Una reconceptualización es una reorganización profunda y fundamental de un entramado más complejo, que es el conocimiento, y que se relaciona con el entendimiento (Wiser, Frazier & Fox, 2013). Es decir, conforme se avanza en la progresión de aprendizaje, cambia la manera de pensar al usar los mismos conocimientos, la manera en que se utilizan los conceptos y las ideas es distinta, aun cuando el concepto sea el mismo.

El ancla inferior es el patrón de *objetivización*, a través del cual las personas razonan usando propiedades relacionadas a objetos para distinguir entre sustancias y mezclas con diferentes materiales. En este patrón, la identidad química de un material (se refiere a la nota al pie de página al principio del documento) es mayormente influenciada por tres categorías de factores. Las personas hacen decisiones sobre clases de identidad química a causa de la similitud superficial en la apariencia del material, por el uso funcional del objeto o de una clase de objetos, o por la historicidad (cuando las personas confían en su conocimiento del origen y la historia del material). Lo que distingue entre el patrón objetivización y los patrones más avanzados es aproximar el conocimiento canónico con tres reconceptualizaciones nombradas en la tabla 2 que son las transferencias en la manera de pensar sobre propiedades de la materia.

Después de este umbral, aparecen dos patrones de percibir la identidad química que dependen de diferentes suposiciones sobre el comportamiento y las propiedades de entidades químicas. Es importante destacar que mientras estos patrones de razonamiento intermedios están entre los anclajes inferiores y superiores, no están necesariamente en orden jerárquico o secuencial. El primer patrón, *principismo*, es caracterizado por la tendencia de considerar que las propiedades son separables de la sustancia. Es decir que la iden-

idad química de una sustancia no cambia aunque una propiedad sea añadida, retirada o expuesta. En este patrón, las personas tienen dificultad para distinguir entre sustancias puras y mezclas homogéneas. Por ejemplo, hay una tendencia a considerar transformaciones de propiedades como cambios físicos aunque sean químicos, cuando se retira una propiedad de la sustancia. Las personas que razonan con este patrón no consideran a las propiedades como si fueran emergentes de interacciones entre entidades sub-microscópicas en movimiento dinámico.

El segundo patrón que también existe después del umbral es el *composicionismo*, caracterizado por enfocarse en los componentes de un material para distinguir su identidad. En muchos países del mundo, durante la escuela secundaria, se introduce a los estudiantes al razonamiento según el modelo de la naturaleza corpuscular de la materia. Por ejemplo, la estequiometría demanda que se considere lo que ocurre a diferentes tipos de átomos (elementos) o iones dentro de cada sustancia en una reacción. Según la hipótesis de la PA, este fuerte énfasis posiblemente resulta en una percepción de que los componentes son responsables por las propiedades de una sustancia. Entonces, las personas que razonan con este patrón tampoco consideran a las propiedades como emergentes.

Estos patrones intermedios y el patrón de conocimiento más canónico relacionado con el ancla superior están relacionados por medio de conceptos umbrales diferentes a los anteriores. Están relacionados con las interacciones dinámicas entre componentes, regiones de estructuras, o partículas, en varias escalas de distancia y tiempo. Es decir, que las re-conceptualizaciones del conocimiento demandan que se consideren interacciones dinámicas y propiedades a diferentes escalas.

El patrón que funciona como ancla superior de la PA es el *interaccionismo*, en el cual el razonamiento resulta en distinguir entre sustancias por su estructura y su naturaleza emergente, de propiedades de las interacciones dinámicas entre varias escalas temporales y de distancia de la estructura. Dentro de una escala temporal, las propiedades son consideradas estables debido a la confluencia de las interacciones.

La hipótesis de la PA de la idea principal de identidad química, según el estudio de Ngai, Sevian y Talanquer (2014), se traduce en un mapa conceptual de cuatro patrones de razonamiento, que se presenta en la tabla 2.

## Discusión y conclusión

La progresión hipotética de identidad química merece investigación empírica para validarla. Mientras los patrones de razonamiento fueron construidos por resultados de diversos estudios, no es seguro si los patrones se manifiestan en realidad entre una población de estudiantes. Además, se ha encontrado que el desarrollo de las PAs requiere un entendimiento más completo y extenso de las suposiciones que guían comúnmente el razonamiento de los estudiantes, pero que también pueden limitarlo al aprender tópicos esenciales en los diferentes niveles de su educación (Sevian & Talanquer,

**Tabla 2.** Mapa hipotético (según Ngai, Sevian y Talanquer, 2014) de patrones de razonamiento mostrando los niveles de la PA de las ideas principales de identidad química, y las hipótesis sobre los conceptos umbrales entre el ancla inferior y niveles intermedios, y niveles intermedios y el ancla superior.

<i>Patrón de razonamiento</i>	<i>Maneras de pensar sobre las sustancias (modelos mentales)</i>
<b>Ancla superior</b> <i>Interaccionismo:</i> Las sustancias son entidades dinámicas, los procesos ocurren dentro de las sustancias	Las sustancias están compuestas de unidades (moléculas, iones), dentro de las cuales puede haber otros niveles de organización (por ejemplo, átomos conectados de maneras específicas dentro de las moléculas, estructura terciaria en proteínas). Las propiedades de una sustancia surgen desde interacciones dentro de las unidades individuales (por ejemplo, grupos funcionales).
<b>Conceptos Umbrales</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diferentes propiedades existen en diferentes escalas temporales y de distancia.</li> <li>2. Las interacciones dinámicas entre entidades químicas, y los factores que las afectan, son relevantes a las propiedades de las sustancias.</li> </ol>
(Patrón 2) <i>Composicionismo:</i> Tendencia a señalar diferencias explícitas sobre la composición de una sustancia o material hasta llegar a excluir la estructura, relación con las características representativas y las propiedades características o tipos de materia.	Las representaciones simbólicas (fórmulas químicas) e icónicas (dibujos de partículas) de las sustancias permiten su diferenciación. Los nombres y las fórmulas químicas proveen información sobre componentes de las sustancias que ayudan a identificar tipos de sustancias. Las sustancias tienen diferentes acomodos de las partículas cuando están en diferentes fases.
(Patrón 1) <i>Principismo:</i> Las propiedades de materiales son debidas a la presencia o ausencia de principios, los cuales pueden ser eliminados o adicionados sin alterar la identidad de la sustancia.	Los materiales tienen algo en ellos que es responsable del comportamiento y propiedades de los mismos. Si esto es eliminado, entonces el comportamiento o la propiedad es eliminada también. Los compuestos químicos tienen propiedades que son combinaciones lineales de los elementos por los cuales están formados. Los cambios químicos y físicos son lo mismo.
<b>Conceptos Umbrales</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los tipos de materia son los constituyentes de los objetos.</li> <li>2. Diferenciar entre una propiedad de un material y una propiedad del objeto (depende en el reconocimiento de propiedades intensivas para categorizar).</li> <li>3. La percepción es limitada, la prueba experimental es útil.</li> </ol>
<b>Ancla inferior</b> <i>Objetivización:</i> Uso de las tres mayores categorías de los factores objeto-relevante para clasificar sustancias: apariencia, uso e historia.	Los tipos de materia se forman de acuerdo con lo que algo hace o puede hacer (su uso o apariencia). Los materiales y los objetos pueden ser indistinguibles. Por ejemplo, el agua se usa para beber, el jabón para limpiar, una tiza y el polvo de tiza no son la misma sustancia.

2014). Es probable que su nivel de integración varíe dependiendo de la naturaleza de las áreas de conocimiento, así como del conocimiento previo y de las experiencias de cada individuo. Entonces, es importante probar el pensamiento de diversos individuos en diferentes culturas y contextos. La mayoría de las investigaciones ven el conocimiento científico y los procesos cognitivos involucrados en el aprendizaje como un aspecto que no varía en las poblaciones, es decir, no hacen una distinción cultural, contextual, de valores morales y/o éticos o en los sistemas de creencias de quienes están aprendiendo. Por ello, en general se acepta que las progresiones de aprendizaje debidamente validadas son las mismas sin importar el contexto o el entorno cultural. Al hacer estudios de educación, es necesario entender el enfoque desde el punto de vista de varias poblaciones pues esto asegura llegar a una educación equitativa para todos. Por la misma razón, es importante validar una PA con estudiantes de diferentes culturas y contextos.

La mayoría de los estudios de progresión del aprendizaje se han realizado en un solo país. Hasta donde se sabe, solo se ha efectuado un estudio entre dos países. Durante una etapa de validación de la progresión de aprendizaje del proceso de transformación del carbón, Jin y Anderson (2012) involucran estudiantes de dos países distintos (EUA y China) en un

esfuerzo por entender de una mejor manera como la cultura afecta el aprendizaje del estudiante. Se esperaba que hubiera una diferencia por los idiomas empleados para razonar por los estudiantes, además de que tienen diferentes experiencias con la ciencia en el sistema educativo (en el currículo y los enfoques de enseñanza). En especial, dado que el ancla principal de la progresión del aprendizaje está relacionada con la estructura histórica de cada país, se pensaba que los estudiantes iban a mostrar diferentes resultados en su progresión de aprendizaje. Los resultados mostraron que en general, los estudiantes de China y de EUA no mostraban una diferencia sustancial en su razonamiento. Sin embargo, hubo diferencias en la manera en que los estudiantes de diferentes niveles educacionales en los distintos países progresan en la complejidad de las explicaciones y en el uso del vocabulario científico. Ambos grupos demostraron una mayor sofisticación en el uso de vocabulario científico que en la complejidad de la explicación, pero la diferencia fue mayor en los estudiantes chinos.

### **Conclusiones del uso de la PA hipotética para estudiar el concepto macroscópico de la sustancia y preparación para la parte II**

La elaboración del concepto macroscópico de la sustancia y

la PA de identidad química que puede explicar cómo evoluciona el pensamiento en esto contribuyen al cuerpo de conocimiento sobre el aprendizaje de química. Sin embargo, es necesario analizar datos sobre cómo piensan estudiantes y profesores mientras enfrentan y resuelven problemas que les hacen utilizar sus ideas sobre el concepto macroscópico de sustancia. La validación empírica de la PA de identidad química entre poblaciones de estudiantes en diferentes países puede arrojar luz sobre si se producen los patrones de razonamiento que predice la PA, y el grado en que varios patrones dependen de la cultura y el contexto.

Se concluye este primer manuscrito reiterando que nuestro objetivo principal fue validar una PA hipotética que muestra la evolución del pensamiento de estudiantes sobre el concepto macroscópico de la sustancia. Conducimos una investigación exploratoria con participantes en universidades en dos países, con el objetivo de descubrir tendencias mayores y poder probar el método para validar la PA. Se reporta esta investigación en la parte II que sigue (Szteinberg, Brenes, Arce y Sevian, 2015). Habiendo presentado la necesidad de hacer este estudio, esperamos que los lectores aprecien la explicación y elaboración del concepto macroscópico de sustancia que ocurre a la base de la disciplina de química.

### Agradecimientos

Agradecemos a las fuentes que nos otorgaron fondos para nuestras investigaciones: US NSF 1222624 y la AAAS WIRC@MSIs. Le damos reconocimiento a Vicente Talanquer por guiar el proyecto del Pensamiento Químico, en colaboración con una de las autoras (HS). Estamos muy agradecidas a Santiago Sandi-Ureña y a María Eugenia Minor por la corrección del manuscrito.

### Referencias

Alonzo, A. and Steedle, J. T., Developing and assessing a force and motion learning progression, *Science Education*, **93**(3), 389-421, 2009.

Alonzo A. C, and Gotwals A. W. *Learning progressions in science: Current challenges and future directions*. Rotterdam, The Netherlands: Sense Publishers, 2012.

Bachelard G., La paradoja del materialismo de los filósofos. De la generalidad a la especificidad. De la homogeneidad a la pureza en *El materialismo racional*. Paidós, Buenos Aires, 1976.

Berland, L. K. and McNeill, K. L., A learning progression for scientific argumentation: understanding student work and designing supportive instructional contexts, *Science Education*, **94**, 765-793, 2010.

Butlerov, A. M., On the Chemical Structure of Substances, *Journal of Chemical Education*, **48**(5), 289-291, 1971.

Chamizo, J. A., Technochemistry: one of the chemists' ways of knowing, *Foundations of Chemistry*, **15**, 157-170, 2013.

Chang H., Compositionism as a dominant way of knowing in modern chemistry, *History of Science*, **49**, 247-268, 2011.

Corcoran, T., Mosher, F. A. and Rogat, A., *Learning progressions in science: an evidence-based approach to reform, Con-*

*sortium for Policy Research in Education Report #RR-63*. Philadelphia, PA: Consortium for Policy Research in Education, 2009.

Duncan, R. G., Rogat, A. and Yarden, A., A learning progression for deepening students' understandings of modern genetics across the 5th-10th grades, *Journal of Research in Science Teaching*, **46**, 655-674, 2009.

Duncan, R. G. and Rivet, A. E. Science Learning Progressions, *Science*, **339**(6118), 296-297, 2013.

Duschl, R., Maeng, S., and Sezen, A. Learning progressions and teaching sequences: a review and analysis, *Studies in Science Education*, **47**(2), 123-182, 2011.

Enke C. G., *The art and science of chemical analysis*. Nueva York, USA: Wiley, 2001.

Hoffmann, R., *The same and not the same*. Columbia University Press, 1995.

Jin, H., and Anderson, C.W. Developing assessments for a learning progression on carbon-transforming processes in socioecological systems. In (Alicia Alonzo and Amelia Gotwals, eds.) *Learning Progressions in Science*, pp. 151-181. Rotterdam: Sense Publishers, 2012.

Johnson, P., A learning progression towards understanding chemical change, *Educación Química*, **24**(4), 365-372, 2013.

Lehrer, R. and Schauble, L., Seeding evolutionary thinking by engaging children in modeling its foundations, *Science Education*, **96**(4), 701-724, 2012.

Martinez, A., Valdes, J., Talanquer, V. y Chamizo, J. A., Estructura de la materia: De saberes y pensares [Structure of matter: Knowing and Thinking]. *Educación Química*. **23**(3), 361-369, 2012.

Mohan, L., Chen, J., Anderson, C.W., Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems, *Journal of Research in Science Teaching*, **46**(6), 675-698, 2009.

National Research Council (NRC), *The next generation science standards*, Washington, D.C.: The National Academies Press, 2013.

Ngai, C., Sevian, H., and Talanquer, V., 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, 2014; doi 10.1080/09500693.2014.927082

Parker, J. M., de los Santos, E. X. and Anderson, C. W., What learning progressions on carbon-transforming processes tell us about how students learn to use the laws of conservation of matter and energy, *Educación Química*, **24**(4), 399-406, 2013.

Salinas, I., Covitt, B. A., and Gunckel, K. L., Sustancias en el agua: progresiones de aprendizaje para diseñar intervenciones curriculares, *Educación Química*, **24**(4), 391-398, 2013.

Schummer, J. The Impact of instrumentation on chemical species identity: From chemical substances to molecular species. En: P. Morris (ed.) *From classical to modern chemistry: The instrumental revolution* (pp. 188-211). Cambridge:

- The Royal Society of Chemistry, 2002.
- Sevian, H. and Stains, M., Implicit assumptions and progress variables in a learning progression about structure and motion of matter. En: Georgios Tsapalis, and Hannah Sevian (eds.) *Concepts of matter in science education* (pp. 69-94). Springer, Netherlands, 2013.
- Sevian, H., and Talanquer, V., Rethinking chemistry: A learning progression on chemical thinking, *Chemistry Education Research and Practice*, **15**(1), 10-23, 2014.
- Siegfried, R. From elements to atoms: A history of chemical composition. *Transactions of the American Philosophical Society*, xcii/4; Philadelphia, 2002.
- Smith, C., Carey, S. and Wisner, M., On differentiation: a case study of the development of size, weight, and density, *Cognition*, **21**, 177-237, 1985.
- Smith, C., Wisner, M., Anderson, C. and Krajcik, J., Implications of research on children's learning for standards and assessment: a proposed learning progression for matter and atomic-molecular theory, *Measurement*, **14**(1&2), 1-98, 2006.
- Spelke, E. S., and Kinzler, K. D. Core knowledge. *Developmental science*, **10**(1), 89-96, 2007.
- Stevens, S., Delgado, C. and Krajcik, J. S., Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter, *Journal of Research in Science Teaching*, **47**, 687-715, 2010.
- Szteinberg, G., Brenes, P., Arce, H. y Sevian, H. Concepción de la identidad química en estudiantes y profesores de química: Parte II – comparación entre participantes de dos universidades en diferentes países, *Educación Química*, **26**(2), en prensa, 2015.
- Talanquer, V., School chemistry: the need for transgression, *Science & Education*, **22**(7), 1757-1773, 2013.
- Wisner, M., Frazier, K. E., and Fox, V., At the beginning was amount of material: A learning progression for matter for early elementary grades. En: *Concepts of matter in science education* (pp. 95-122). Springer Netherlands, 2013.