



DIDÁCTICA DE LA QUÍMICA

Concepción de la identidad química en estudiantes y profesores de química. Parte II: comparación entre participantes en dos universidades de diferentes países

Gabriela Szteinberg^a, Paula Brenes^b, Heilen Arce^b y Hannah Sevian^{c,*}

^aDepartment of Chemistry, Washington University in St. Louis, St. Louis, Missouri, Estados Unidos

^bEscuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

^cDepartment of Chemistry, University of Massachusetts Boston, Boston, Massachusetts, Estados Unidos

Recibido el 4 de junio de 2014; aceptado el 2 de septiembre de 2014

PALABRAS CLAVE

Progresiones de aprendizaje;
Concepciones alternativas;
Concepto de sustancia;
Currículo de química

Resumen Como continuación del documento anterior, en el que fue introducido y explicado el concepto de identidad química, se procede a presentar en este los elementos que se utilizan para coleccionar y analizar entrevistas cognitivas y los resultados, las implicaciones y las conclusiones de un estudio de comparación cultural entre estudiantes de una universidad en Costa Rica y otra en Estados Unidos. También se marcan las diferencias curriculares entre los dos países investigados. Los resultados de la investigación indican, tentativamente, la manera de razonar sobre la identidad química, lo que además se puede usar como parte del contexto de razonar sobre los beneficios, los costos y los riesgos y las relaciones entre la estructura y las propiedades en la química. Este trabajo muestra la diversidad del pensamiento sobre la identidad química en países con diferentes currículos, con poblaciones estudiantiles de diferentes tamaños y que presentan contextos de diferente carácter geográfico, cultural y social, lo que fortalece la validación de la progresión de aprendizaje hipotética.

Derechos Reservados © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0.

KEYWORDS

Learning progressions;
Alternative conceptions;
Concept of substance;
Chemistry curriculum

Chemistry students' and professors' conceptions of chemical identity. Part II – Comparison of participants at two universities in different countries

Abstract In continuation from a previous paper, in which the concept of chemical identity was introduced, the elements that were used to collect and analyze cognitive interviews are presented, along with the results, implications and conclusions of a cultural-comparison study between students from a university in Costa Rica and another in the United States. Curricular diffe-

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: hannah.sevian@umb.edu (H. Sevian).

rences between the two countries studied are also described. The results indicate, tentatively, patterns of reasoning about chemical identity, and also how they manifest in the context of a problem about benefits, costs and risks, as well as relationships between structure and properties, in chemistry. Diversity of thinking about chemical identity is shown across two countries with different chemistry curricula, and among student populations of different educational performance, in contexts with different geography, culture, norms, and other societal variables, which strengthens the validation of the hypothetic learning progression.

All Rights Reserved © 2015 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. This is an open access item distributed under the Creative Commons CC License BY-NC-ND 4.0.

Introducción

El concepto macroscópico de sustancia no es trivial. Al contrario que el concepto teórico, que describe únicamente una sustancia en términos de su composición y estructura ideal y submicroscópicas, el concepto macroscópico 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. Este concepto fue elaborado en la parte I (Sevian, Ngai, Szeinberg, Brenes y Arce, 2015), en que se presentaron la historia de varias conceptualizaciones de sustancia y una explicación de la identidad química como base del concepto macroscópico de sustancia. También fue presentada una progresión de aprendizaje (PA) hipotética de Ngai, Sevian y Talanquer (2014), que pertenece al marco teórico más extenso de “pensamiento químico” (Sevian y Talanquer, 2014). El objetivo principal de este trabajo es presentar los resultados de un estudio diseñado para validar empíricamente la PA hipotética de identidad química. Según la discusión de la parte I, la validación se fortalece al investigar las ideas de estudiantes en varios contextos y culturas, porque los patrones de razonamiento elaborados en la PA fueron construidos por resultados de diversos estudios, de modo que no es seguro que los patrones se manifiesten en realidad entre una población tal de estudiantes.

Preguntas de investigación

El objetivo de investigación es la evaluación de cómo los estudiantes y profesores afrontan y resuelven un problema que los hace utilizar sus ideas sobre el concepto macroscópico de sustancia. Específicamente, se llevó a cabo una investigación exploratoria con el objetivo de descubrir tendencias mayores y poder probar el método para validar la PA. Dos preguntas guiaron la investigación: ¿cómo evalúan los estudiantes y profesores de química qué material^a es mejor utilizar con el propósito de resolver un problema auténtico que requiere el uso del concepto macroscópico de sustancia? y ¿cómo refina los resultados de la primera pre-

gunta de investigación la PA hipotética de la identidad química?

Marco teórico

Para evaluar opciones y tomar una decisión sobre cuál sería la mejor opción para un propósito dado, se usó el marco teórico de Sevian y Talanquer (2014), porque da la oportunidad de extraer suposiciones que se podría comparar con los patrones de razonamiento de la PA hipotética de identidad química.

Suposiciones en una PA y su dependencia de la cultura

Este trabajo se basa en un modelo teórico que propone que el razonamiento en química comúnmente se guía por suposiciones implícitas o explícitas sobre la naturaleza de las entidades químicas y sus procesos (Talanquer, 2005; Talanquer, 2009; Maeyer y Talanquer, 2013). La naturaleza de estos elementos cognitivos puede cambiar a través del desarrollo de las personas en este aspecto. Las suposiciones se usan frecuentemente, pues dan respuestas aceptables con poco esfuerzo, aunque en ocasiones llevan a errores graves y parcializados (Hatano e Inagaki, 2000; Keil, 1990; Fiske y Taylor, 2008). Varios investigadores de distintas áreas (ciencia cognitiva, educación, educación científica) han identificado elementos que guían y apoyan o limitan el razonamiento de los estudiantes en los diferentes campos, tales como conocimientos esenciales (Spelke y Kinzler, 2007), presuposiciones implícitas (Vosniadou, 1994), creencias ontológicas (Chi, 2008), intuiciones esenciales (Brown, 1993), reglas intuitivas (Stavy y Tirosh, 2000) y recursos conceptuales (Redish, 2004). Sin embargo, hay debate sobre el efecto que tienen estos tipos de elementos cognitivos en sistemas coherentes de conocimiento integrado o colecciones fragmentadas de recursos cognitivos (diSessa, 2008; Brown y Hammer, 2008; Vosniadou et al., 2008). Talanquer (2009) ha ilustrado este enfoque en el análisis de la evolución de las ideas de los estudiantes sobre el modelo corpuscular de la materia. Por ejemplo, muchas dificultades de aprendizaje en esta área parecen estar asociadas con la tendencia de los alumnos a asumir que las sustancias son entidades homogéneas, de modo que sus propiedades son las mismas a todas las escalas (p. ej., los átomos y las moléculas tienen igual densidad o punto de fusión que la muestra macroscópica de la que forman parte).

^a En este documento, por “material” se entiende una muestra de materia que puede ser sustancia (pura) o mezcla de sustancias. La palabra “materia” se usa como sustantivo general (con el significado de *matter* en inglés).

De una manera similar al estudio de Jin y Anderson (2012), que estudiaron la comprensión del proceso de transformación del carbono que alcanzaron estudiantes en dos países distintos (Estados Unidos y China), se espera en este estudio que los estudiantes de Costa Rica y Estados Unidos demuestren diferencias en los patrones de razonamiento y las maneras en que razonan. Esas diferencias pueden deberse a las diferencias en el currículo en química y a los enfoques con que se enseña química, así como los ejemplos típicos a los que los estudiantes se ven expuestos. Además, donde los pensamientos de identidad química y de beneficios-costos-riesgos se intersectan, hay que diferenciar los valores que pueden participar en la manera en que los estudiantes evalúan las opciones y toman decisiones.

Marco de análisis para la progresión de aprendizaje

En un ambiente de aprendizaje, los estudiantes van a usar las suposiciones y estrategias de razonamiento que perciben como más relevantes a la situación presentada, lo que puede limitar o sesgar el alcance de sus modelos mentales. Estos dos tipos de limitaciones cognitivas propias de cada individuo pueden evolucionar (modificarse) por medio del conocimiento que se va adquiriendo, las experiencias, el contexto, los objetivos, etc. Por ello, para tener una PA es necesario disponer de un conocimiento general de las limitaciones cognitivas que presentan los estudiantes al aprender un tópico determinado. Según el marco de Sevian y Talanquer (2014), el pensamiento químico se mide por dos tipos de variables: la sofisticación conceptual y los modos de razonamiento.

La sofisticación conceptual está determinada por la naturaleza de las suposiciones subyacentes sobre la estructura y las propiedades de las entidades químicas y los fenómenos. Esta variable se divide en tres niveles: *a*) intuitivo, cuando se dan explicaciones simples que implican experiencias diarias; *b*) híbrido, cuando se dan explicaciones mezcladas entre lo intuitivo y más complejas, en las que la interpretación de experiencias diarias implica un poco de pensamiento avanzado, y *c*) académico, cuando las explicaciones están basadas en información aprendida y modelos científicos establecidos. Por ejemplo, Talanquer (2009) ilustra el análisis de suposiciones de la evolución de razonamiento de los estudiantes respecto al modelo de la materia, donde se observa que muchas de las dificultades de aprendizaje que presentan los estudiantes se dan porque ellos consideran las sustancias como si fueran portadoras de propiedades (esto indica una posición sustancialista). Este enfoque permite el reconocimiento de la naturaleza dinámica y contextual de las ideas de los estudiantes (Sevian y Stains, 2013). Por ejemplo, un estudiante puede ser más sofisticado en el conocimiento químico sobre teoría cinética-molecular que en el de fuerzas intermoleculares. Un determinado contexto puede estimular al estudiante a relacionar ciertas ideas de teoría cinética-molecular, por lo que podría fusionar ideas intuitivas con conocimiento académico para terminar con suposiciones híbridas sobre la trayectoria de las moléculas cuando un perfume se difunde en una habitación. Un contexto diferente puede estimular al mismo estudiante a relacionar ideas sobre fuerzas intermoleculares y podría terminar con suposiciones intuitivas sobre cómo la forma

influye el movimiento de los objetos a través de un fluido cuando se considera la difusión de diferentes compuestos con olor. Las suposiciones que ocurren más comúnmente en la población estudiantil cuando afrontan problemas que requieren un conocimiento en química pueden dar una idea de cómo los supuestos cambian con el tiempo de enseñanza.

Los modos de razonar describen la complejidad del razonamiento utilizada en un argumento o explicación. Más específicamente, describen cómo un individuo utiliza la información suministrada junto con el conocimiento adquirido previamente para tomar decisiones, argumentar, explicar y hacer predicciones. Estos modos se categorizan como razonamiento descriptivo (razonamiento basado en ideas o características superficiales y cotidianas, no se explican las causas de un fenómeno), relacional (se explican relaciones entre espacio y tiempo, pero no se da un porqué, un fenómeno se justifica simplemente por una causa o propiedad o la combinación lineal de varias propiedades, se generaliza en exceso y se reducen las variables), lineal-causal (se explican mecanismos simples o lineales en los cuales hay relaciones de causa y efecto o una secuencia de cadena de eventos, se reducen las variables), multicomponente aislado (se explican varias relaciones de variables, pero su efecto se considera por separado) o multicomponente integrado (se consideran todas las variables posibles que causan un fenómeno y se explican las relaciones entre todas ellas).

Metodología

Como parte de un proyecto sobre progresiones de aprendizaje en pensamiento químico (Szteinberg et al., 2014), se desarrolló un protocolo para entrevistar a estudiantes (anexo 1). Este protocolo presenta un escenario de evaluación en el cual los participantes tienen que tomar decisiones y explicar por qué elegirían un combustible (las opciones son: gasolina de petróleo, gasolina de trozos de madera, gas natural o E85) para activar un GoKart. Al comienzo de la entrevista, se comenta a los participantes que la gasolina está mayoritariamente constituida de octano, el gas natural de metano, y el E85, de etanol, y también que el costo por litro es el mismo para todos los tipos de combustible. Durante la entrevista se proporciona de manera gradual información sobre el estado físico de cada combustible, los componentes atómicos, las estructuras moleculares y, finalmente, información de que cada combustible puede ser contaminante para el medio ambiente. En cada etapa, se pide a los participantes que elijan cuál sería el combustible que elegirían y que justifiquen su elección.

Los autores decidieron utilizar entrevistas semiestructuradas para recolectar datos, porque permiten conseguir más información de los participantes (Patton, 2002). El protocolo se diseñó en inglés y se modificó después de probarlo con cinco estudiantes de Estados Unidos. Luego uno de los autores hizo la traducción al español y el resto del equipo de investigación y dos investigadores costarricenses externos al proyecto lo revisaron y proporcionaron mejoras a la traducción.

La tabla 1 presenta el número de participantes de cada institución y de cada nivel académico. Aunque sea una investigación exploratoria, se espera que las cantidades de participantes incluidos en la investigación sean suficientes

Tabla 1 Número de participantes en Estados Unidos y Costa Rica de cada nivel académico en Química

País	Primer año (P)	Segundo y tercer año (M)	Cuarto año (Ú)	Posgrado o profesor (E)	Suma parcial
Estados Unidos (EU)	7	4	2	4	17
Costa Rica (CR)	4	9	3	6	21
Suma parcial	11	13	5	10	

para descubrir tendencias, aunque no logren dar pie a conclusiones definitivas. En Estados Unidos, los autores obtuvieron permiso del Comité de Ética (*Institutional Review Board* [IRB]) de la universidad estadounidense para realizar el estudio con personas en ambos sitios. También en Costa Rica se solicitó el permiso del Comité de Ética de la universidad, pero se nos informó que, dadas las condiciones del estudio, no era necesario contar con el aval de esta entidad. Se decidió categorizar los niveles académicos como año inicial (código P = primero), los años intermedios (código M = segundo y tercero), último año de universidad (código Ú = cuarto) y años de expertos (código E = posgrado y profesores). Se indican los participantes por el país (CR, Costa Rica; EU, Estados Unidos), el nivel académico (P, M, Ú o E), y su número ordinal en este grupo. Por ejemplo, en los resultados, un extracto del cuarto participante del primer año universitario de la universidad en Estados Unidos se indica con el código EU-P4.

Las entrevistas fueron grabadas en audio con un iPad o iPhone, o semejantes, a través de una aplicación de grabación (como iRecorder). Las entrevistas duraron entre 15 y 40 min, y todos los autores estuvieron a cargo de realizar una o más entrevistas. Los autores tomaron precaución de estar de acuerdo con el modo de hacer la entrevista para eliminar, en lo posible, variaciones por haber tantos entrevistadores diferentes. Se transcribieron todos los archivos de audio, y posteriormente los autores nativos de Costa Rica revisaron todas las entrevistas transcritas para discernir las expresiones típicas del español de Costa Rica.

Al hacer la codificación de cada entrevista, primero se separó en extractos, que fueron resumidos en temas breves y se codificaron según las seis diferentes ideas principales (identidad química, estructura-propiedades, causalidad, mecanismo, control y beneficios-costos-riesgos, según la explicación del marco de pensamiento químico en la parte I). Se prestó atención a los extractos que contienen identidad química, pero también a los que contienen estructura-propiedades y beneficios-costos-riesgos, ya que son conceptos cercanos. Cuando fue posible, se distinguió entre estructura-propiedades e identidad química por medio de la dirección de la lógica al referirse a propiedades (según la explicación anterior). Cuando no se pudo distinguir entre identidad química y otros conceptos en un extracto, se guardó en la colección de todos los extractos. En la mayoría de estos casos se utilizó el modo de razonamiento relacional para declarar una propiedad como razón para elegir o descartar una opción. Por ejemplo, un participante podría decir “No usaría el octano porque causa contaminación”. Este es un ejemplo de este tipo de razonamiento; primero, al analizar la relación beneficios-costos-riesgos con fundamento en el razonamiento de identidad química (el combustible causa contaminación, entonces es octano) o estructura-pro-

iedades (el octano causa contaminación como resultado de algún rasgo de su identidad). El modo de razonar en este caso es relacional, porque el participante declara una asociación entre la identidad de la sustancia y las consecuencias. A falta de más información, es imposible decir si el participante infiere la identidad de la propiedad de contaminar u obtiene la propiedad por algún rasgo de la identidad.

Cada extracto se categorizó según su sofisticación conceptual, su modo de razonar y las palabras clave empleadas por el entrevistado. Posteriormente se hizo una clasificación holística de cada entrevista considerando los factores indicados anteriormente, pero además se codificaron con los patrones de pensamiento encontrados. Luego de discutir los resultados, y a través de nuevas formas de ver la teoría en la cual se basa este estudio, en los extractos se identificaron los temas de identidad química. Las variables elegidas para medir provienen del marco teórico presentado anteriormente (en el marco de análisis para la PA) y en el trabajo de Ngai, Sevan y Talanquer (2014). Esta nueva codificación ayudó a ver claramente en qué aspectos se basaron los participantes para distinguir sustancias, y a partir de este punto se continuó el análisis solo con los extractos de identidad química. Este análisis ayudó a interpretar las similitudes y diferencias de una parte del pensamiento químico entre estudiantes de una universidad en Estados Unidos y otra en Costa Rica, como se detalla en la sección de resultados. Cada entrevista fue codificada por más de un autor y la mayoría por todos los autores. En caso de algún desacuerdo, se discutió hasta llegar a un acuerdo. A través de las conversaciones, el acuerdo entre codificadores llegó a ser del 100%, por lo tanto, más que aceptable para presentar en este trabajo (Ary, Jacobs & Razavieh, 2002).

Antecedentes de las poblaciones estudiadas

Como ya se ha mencionado, la validación de la PA se fortalece al investigar las ideas de estudiantes en varios contextos y culturas. Así, se estableció una colaboración internacional entre los grupos de investigación de dos profesoras: un grupo de una universidad en el noreste de Estados Unidos y un grupo de una universidad de San José, Costa Rica.

Con referencia al anexo 2, la diferencia principal entre los currículos de las dos universidades es la importancia en Costa Rica de la química industrial, y su falta de énfasis en Estados Unidos. En Costa Rica, la química industrial es un curso universitario de dos semestres tomado en el cuarto año, mientras que en Estados Unidos este curso no existe en el currículo. Otra diferencia importante es que en las universidades de Estados Unidos existen cursos de bioquímica obligatorios, mientras que no los hay en Costa Rica. Por otra parte, la universidad en Costa Rica, en general, promueve el conoci-

miento de la realidad del país por medio de cursos de carácter obligatorio que se ofrecen a todas las carreras. Por ejemplo, la política, la ecología, el estado de la educación y las prioridades nacionales (Costa Rica ha declarado la intención de convertirse en el primer país “carbono neutro” en el mundo); todos estos temas son parte de la educación química en la universidad. La meta de llegar a ser un país “carbono neutral” tiene relación especial con la investigación porque muchos estudiantes piensan sobre las consecuencias de usar el petróleo. En cambio, en la universidad de Estados Unidos no se dan estos cursos y mucho menos el énfasis y las consecuencias de los problemas nacionales, ya que se enfocan en las materias de la carrera. Hay que tomar en cuenta estas y otras diferencias, ya que hay relación directa entre la manera de afrontar un problema y el conocimiento adquirido.

También hay dos diferencias en el orden con que se introducen los tópicos en los currículos en Costa Rica y Estados Unidos. Primero, en Estados Unidos se da más importancia que en Costa Rica a la teoría cinética-molecular de la materia. En Estados Unidos se introduce el modelo corpuscular de esta naturaleza en la escuela secundaria (a estudiantes de 13 años, la mayoría de las veces); en cambio, en Costa Rica se introduce este conocimiento en etapas posteriores (como en el segundo semestre del primer año universitario). En Estados Unidos se introduce el modelo básico de oxidación-reducción en el segundo semestre universitario de la química general, y se repite en más detalle al estudiar reacciones de electroquímica. En Costa Rica también se introduce el modelo básico en el segundo semestre universitario de química general, pero el concepto es más puntualizado y se repite muchas veces en el currículo, incluso durante cursos como análisis químico (segundo año), fisicoquímica (tercer año) y química industrial (cuarto año).

Estas diferencias entre los currículos de las universidades estudiadas en los dos países han sido y seguirán siendo importantes en nuestro análisis. Las diferencias son parte del contexto cultural de cada población de estudiantes que estudiamos, por lo que tiene potencial de guiar mucho de lo que cada participante dice.

Resultados

Pregunta de investigación 1: ¿cómo evalúan los estudiantes y profesores de química qué material es mejor utilizar con el propósito de resolver un problema auténtico que requiere el uso del concepto macroscópico de sustancia?

Para responder a esta pregunta, explicamos los resultados en términos de los niveles de sofisticación conceptual, modos de razonar y los patrones de razonamiento que indicaron el uso de las ideas principales de química que los participantes utilizaron para explicar su selección de sustancias durante la entrevista.

Sofisticación conceptual

A través de los niveles de educación en ambas instituciones, se observó que los participantes demostraron sofisticación

conceptual a nivel intuitivo, híbrido y académico. En la tabla 2 se ve que los participantes de Estados Unidos demostraron sofisticación conceptual intuitiva en mayor proporción que los de Costa Rica. Asimismo, un porcentaje más alto de participantes de Costa Rica demostraron sofisticación conceptual a nivel híbrido. Es posible que cada participante haya demostrado más de un nivel de sofisticación conceptual en su entrevista. Sin embargo, en casi todos los casos fue posible distinguir el nivel de sofisticación conceptual más sobresaliente y por lo tanto cuál parece guiar el pensamiento del participante en el momento en que se le hizo la entrevista. Se encontró que en ambas instituciones había una progresión de sofisticación conceptual, y dentro de cada nivel institucional había una distribución de los niveles de sofisticación conceptual. Es decir, los participantes de primer año demostraron nivel de sofisticación conceptual intuitivo, híbrido y académico, pero la mayoría demostró nivel intuitivo, y en el nivel de posgrado y profesor había más nivel académico. Como muestra la figura 1, hay una distribución de la sofisticación conceptual dentro de cada uno de los niveles educacionales. También se muestra allí que la tendencia en ambas universidades conforme se avanza hacia niveles mayores es a aumentar la sofisticación conceptual.

Los participantes de ambas instituciones demostraron razonamiento de identidad química y también beneficios-costos-riesgos. En algunos casos, se observa que los participantes de ambas instituciones razonaban usando principalmente beneficios-costos-riesgos. Por ejemplo, un participante de Costa Rica utilizó su conocimiento de la huella del carbono para razonar cómo las sustancias son diferentes, basándose en cómo afectan al medio ambiente por su posibilidad de dejar una huella de carbono mayor que cero.

“Bueno, en el caso del etanol, cuando uno piensa en que la huella de carbono sea cero, ¿verdad?, porque yo estoy partiendo del hecho de que el etanol lo voy a extraer de una fuente biológica y, por lo tanto, el CO₂ que estoy produciendo se consumió en el pasado; para formarlo, en el caso de estos, bueno, pues también tienen los problemas del funcionamiento del motor, me va a producir otros contaminantes para los que realmente se produce, pero realmente, o sea, como tal la información de saber que este está hecho de carbono e hidrógeno, este, carbono e hidrógeno y este que tiene oxígeno, a diferencia de los demás, este, bueno, para mi

Tabla 2 Comparación de tipos de sofisticación conceptual demostrada por estudiantes de Estados Unidos y Costa Rica

Nivel de sofisticación conceptual	Estados Unidos	Costa Rica
Intuitivo	41% (7)	27% (6)
Híbrido	24% (4)	36% (8)
Académico	35% (6)	36% (8)

Los valores son porcentajes de los participantes en esa categoría del total de personas entrevistadas en cada grupo institucional, seguidos por el número de participantes entre paréntesis.

opinión, no es un factor muy... como muy de peso, con respecto a... comparándolo con todo lo demás” (CR-E1, posgrado).

De la misma forma, un participante de Estados Unidos también hizo uso de razonamiento de beneficios-costos-riesgos para hablar de diferencias entre las sustancias (nota: todos los extractos en inglés fueron traducidos al español):

“Teóricamente uno ve el octano y, si solo se considera quemar octano, entonces no va a haber ninguna diferencia, pero si uno quiere ser realista, uno, si está pensando en la huella en el medio ambiente, entonces uno tiene que pensar acerca de dónde viene, pero también de forma química sabemos que la gasolina no es cien por ciento octano, es una mezcla, y esto es n-octano en el que puede haber octanos ramificados, y eso va a cambiar la imagen química, y porque se habla de extraer de fuente de madera; las otras cosas que no son solo carbono e hidrógeno, se pueden obtener

otros compuestos que también se podrían quemar, y es por eso que pienso que los combustibles de gasolina son los peores para el medio ambiente en relación con la combustión, porque no solo van a producir CO₂, combustión incompleta de CO y otros gases, hidrocarburos, porque no pasan por la combinación, y también se obtienen cosas como compuestos de azufre y nitrógeno que están ahí, y quizá depende de dónde están las cosas, quizá se obtengan algunos metales pesados que se meten ahí, entonces estos son escupidos hacia afuera y es posible que sean masa tóxica” (EU-E1, posgrado).

Modos de razonar

La mayoría de los participantes de Estados Unidos utilizaron un modo de razonar relacional, mientras que los participantes de Costa Rica variaron desde relacional a multicomponente integrado (tabla 3). En general, se encontró que los diferentes modos de razonar no demuestran necesariamente una progresión desde un nivel académico inicial hasta

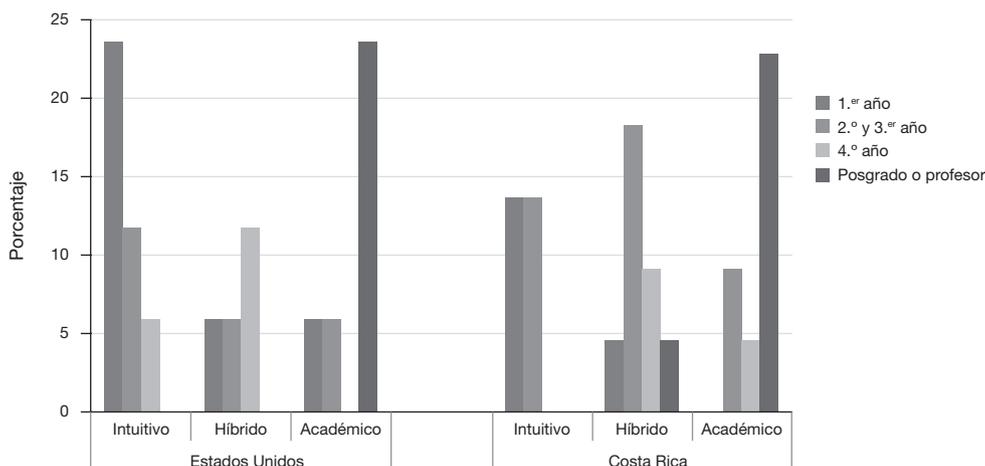


Figura 1 Porcentaje de participantes que demostraron diferentes niveles de sofisticación conceptual en los cuatro niveles de educación en cada universidad.

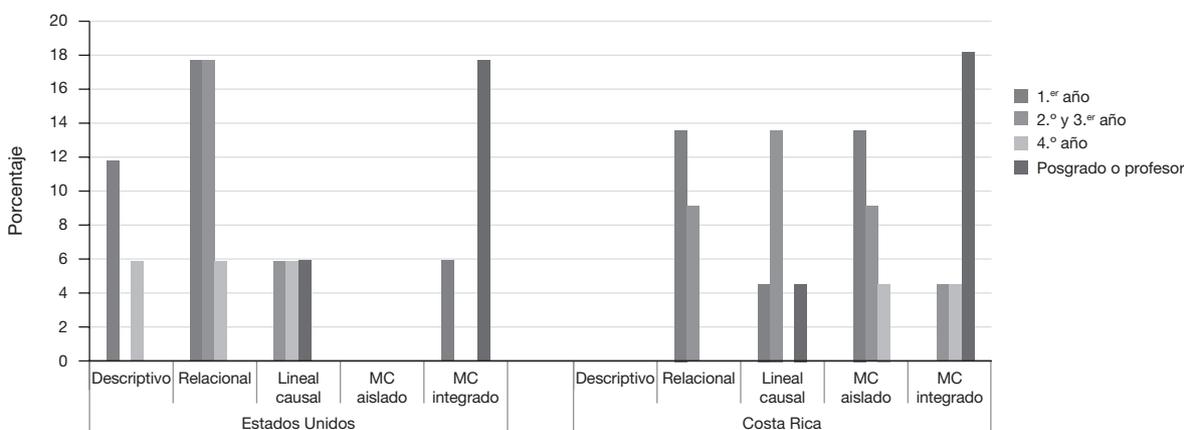


Figura 2 Porcentaje de participantes que demostraron diferentes niveles de modo de razonar en los cuatro niveles de educación en cada universidad. MC: multicomponente.

Tabla 3 Comparación de modos de razonar demostrados por estudiantes de Estados Unidos y Costa Rica

Modo de razonar	Estados Unidos	Costa Rica
Descriptivo	18% (3)	0
Relacional	41% (7)	23% (5)
Lineal causal	18% (3)	23% (5)
Multicomponente aislado	0	27% (6)
Multicomponente integrado	24% (4)	27% (6)

Los valores son porcentajes de los participantes en esa categoría del total de personas entrevistadas en cada grupo institucional, seguidos por el número de participantes entre paréntesis.

uno más experto (fig. 2). Como se reportó anteriormente (Sevian y Talanquer, 2014), los expertos pueden demostrar una sofisticación conceptual alta para expresar su razonamiento a nivel relacional porque notan claves relevantes.

Se encontró que el modo de razonar descriptivo fue el más frecuente en los estudiantes del primer año, y solamente en el grupo de Estados Unidos, y también se notó la ausencia del modo de razonar multicomponente aislado entre los participantes de Estados Unidos. Los demás modos de razonar fueron evidentes en cada nivel educacional. Se muestran ejemplos de extractos de algunas entrevistas en la tabla 4.

El modo de razonar descriptivo se caracteriza por una repetición de datos dados sin referencia a ningún factor asociativo ni mecanicista. En el caso del ejemplo descriptivo de la tabla 4, el estudiante reconoce diferencias entre los combustibles por su fase, pero responde rápidamente, sin mostrar más evidencia o información que la proporcionada.

En el razonamiento relacional, se muestra una asociación entre un factor y un resultado o consecuencia. En el ejemplo de la tabla 4, el estudiante nombra una razón (la disponibilidad de octano), pero sin explicación causal. Es decir, el estudiante diferencia entre combustibles por su disponibilidad, pero después de varias preguntas no pudo explicar por qué la disponibilidad es importante para distinguirlos.

El razonamiento lineal causal se evidencia por una explicación mecanicista. En el ejemplo de la tabla 4, como en el descriptivo, el participante proporciona una explicación que diferencia entre los combustibles por su fase, pero en este caso describe el mecanismo de fuga que acompaña al proceso de quema (“gotita a gotita”, por ser líquido).

El modo de razonar multicomponente se caracteriza por más de una variable o factor causal identificado, pero se divide entre argumentos aislados e integrados. También, las variables pueden ser expuestas de manera relacional o lineal causal. En el ejemplo multicomponente aislado de la tabla 4, el participante expone dos variables importantes para distinguir entre combustibles, la diferencia entre enlaces rotos y formados, y la diferencia entre enlaces de C-O y C-C. No une las variables en el mismo argumento, sino que presenta las dos como razones distintas que explican la diferencia entre los combustibles, y su razonamiento para cada variable es relacional. En contraste, en el ejemplo multicomponente integrado, el participante distingue entre

combustibles por su método de obtención (natural o sintético), su potencial contaminante, sus propiedades tóxicas para los seres humanos y los tipos de átomos que los conforman. Usa las cuatro variables de manera integrada, ya que relaciona el metano y el octano por el tipo de átomos y a su vez relaciona el octano con la contaminación, por lo que relaciona el metano con la contaminación. Además indica que lo contaminante es lo sintético, por lo que diferencia al mismo tiempo metano y octano, aun cuando lo natural también podría contaminar (similitud entre metano y octano).

Dentro de las similitudes en la sofisticación conceptual y los modos de razonar, los participantes muestran algunas diferencias. Los estudiantes de la universidad en Estados Unidos demostraron menores niveles de sofisticación conceptual y modos de razonar que los de Costa Rica. Como muestra la tabla 2, los participantes de Estados Unidos tenían sofisticación conceptual de nivel intuitivo en mayor proporción que los de Costa Rica. También, aunque los participantes de las dos universidades muestran un progreso constante en nivel educativo, se puede ver que los participantes de Costa Rica progresan más rápidamente (fig. 2).

Patrones de razonamiento

Las entrevistas fueron codificadas para asignar un patrón de razonamiento principal según la hipótesis de la PA de identidad química presentada en la parte I. Las diferencias entre los patrones y el refinamiento de la PA se presentan en la siguiente sección (pregunta de investigación 2); sin embargo, se encontraron diferencias entre las universidades en términos del patrón observado (tabla 5).

La diferencia más notable en el caso de la comparación de los patrones de razonamiento empleados por los participantes de ambas instituciones es que los de Costa Rica no utilizaron principismo para explicar cómo razonaron para diferenciar sustancias o las propiedades que resultarían. En general, se encontró que los participantes utilizaban principismo cuando trataban de explicar que las sustancias tenían propiedades provenientes de principios. Por ejemplo, en el siguiente extracto, el participante distingue entre combustibles por su fase y explica que, aparte de sus componentes, el principio de ser líquido se puede añadir o quitar de una sustancia sin cambiar de identidad.

Participante: Creo que es importante, pero quisiera saber por qué el gas tendría carbono e hidrógeno; y luego el líquido: todos estos líquidos son de carbono e hidrógeno, pero no este. Pero no quisiera cambiar mi respuesta porque todavía necesito saber...

Entrevistador: ¿Me puedes explicar un poco más sobre eso?

Participante: Sí, no entiendo por qué el gas natural sería de carbono e hidrógeno así como los otros dos líquidos, los pedazos de madera y el otro, pero no el etanol, que también es un líquido.

Entrevistador: ¿Qué quieres decir con “no el etanol”?

Participante: Porque este tiene oxígeno también, y estos no.

Entrevistador: Ah, ¿entonces el oxígeno es importante?

Tabla 4 Ejemplos de modos de razonar extraídos de varias entrevistas de participantes de diferentes niveles educativos y ambas universidades

Modo de razonar	Ejemplo de las entrevistas
Descriptivo (EU-Ú2)	<p>Entrevistador: (después de que el participante dice que no sabe si cambiaría su decisión al saber el estado físico de las sustancias presentadas) Entonces, ¿no tienes información de por qué un líquido sería peor que un gas o viceversa?</p> <p>Participante: Sí, como que, ¿por qué sería mejor un líquido que un gas? No lo sé. Nada me dice por qué un líquido sería mejor que un gas si se usa algo que no es peligroso para el medio ambiente, o algo así. Pero aun así procesado correctamente.</p> <p>Entrevistador: OK. ¿Piensas que la fase es importante? ¿Piensas que es importante si es un líquido o un gas?</p> <p>Participante: (pausa larga) Probablemente sería más fácil manipular el líquido que el gas porque el gas a veces es difícil de detectar, como si está fugándose o qué está pasando, pero siempre se puede detectar eso con un líquido.</p> <p>Entrevistador: OK. ¿Pero todavía elegirías el gas?</p> <p>Participante: Pienso que sí.</p>
Relacional (CR-M3)	<p>Participante: Bueno, yo lo escogería por ser lo que normalmente se utiliza. Y es más fácil conseguirlo, relativamente. Y los motores normalmente se trabajan con eso, entonces ya es un diseño muy parecido, y no hay que hacer muchos cambios al motor. El motor, digamos, normal.</p> <p>Entrevistador: Entonces, dices que, normalmente, lo que ustedes usan en el auto es el mismo octano.</p> <p>Participante: Sí, utilizar algo parecido.</p> <p>Entrevistador: ¿Y decís que sería fácil obtenerlo?</p> <p>Participante: De la misma manera que se obtendría para el automóvil, tenerlo para ello, digamos.</p>
Lineal causal (CR-P2)	<p>Entrevistador: ¿Le parece importante saber esta información?</p> <p>Participante: Que sea líquido o gas, sí, porque digamos <i>diay</i>*, si nos ponemos con... Es que no sé, el gas, siento que es como que hay una fuga y se puede liberar más, digamos más rápido, más fácil, entonces queda, digamos, una chispa o algo así en caso de un accidente, no sé si la palabra correcta es chispa, una llama o algo así, entonces va a provocar una, no digo que los otros no, pero digamos los otros puede que vaya saliendo gotita a gotita, este va a ser ya un gas que va a salir como más.</p> <p>Entrevistador: ¿Más rápido?</p> <p>Participante: Más rápido, ajá, entonces creo que por eso me quedaría igual con los líquidos</p>
Multicomponente aislado (CR-M2)	<p>Entrevistador: OK, decís que al ser una molécula más grande produciría más energía. ¿Por qué?</p> <p>Participante: Hay más, por rompimiento de más enlaces.</p> <p>Entrevistador: Habla un poquito más (risas).</p> <p>Participante: Este, bueno, vendría a ser la energía liberada. Bueno, no, con solo la vista de la molécula no bastaría, hacen falta también los productos de reacción para saber el balance de enlaces rotos a enlaces formados y todo eso generaría un promedio de la energía que puede liberar por molécula, al ser más grande, este, tendría más enlaces que se pueden romper en la molécula y liberaría más energía, aunque también cuenta la energía relativa de los enlaces, que por ejemplo en el etanol este enlace carbono-oxígeno es más fuerte que un carbono-carbono simple, pero no se compensaría con la cantidad que hay en el octano, y el metano me daría menos, tiene menos energía.</p>
Multicomponente integrado (EU-P2)	<p>Participante: Solo para contaminación, yo creo que metano ... (pausa larga) Sí, yo creo que metano. Para ser honesto, técnicamente no creo, si voy a elegir metano, entonces, por qué no octano. Los dos tienen los mismos tipos de átomos. Estoy seguro de que sé que la gasolina de octano no es buena porque sé que se usa en aviones y, realmente, no pienso que sea el mejor para la contaminación. Solo me estoy basando en mi sentido común.</p> <p>Entrevistador: OK. ¿Y a qué te refieres cuando piensas en la contaminación? ¿Qué es la contaminación?</p> <p>Participante: ¿En términos de combustible?</p> <p>Entrevistador: En cualquier contexto.</p> <p>Participante: Solo poner cosas dañinas en el medio ambiente. Pero algo dañino puede ser dañino al medio ambiente, dañino a la capa de ozono, carcinogénicos dañinos, dañino para los humanos y los animales. Hasta la basura es técnicamente contaminación. No creo que una bolsa de papitas vaya a lastimar a alguien, pero al ensuciar el planeta y llenarlo de cosas hechas por el hombre o sustancias sintéticas como una bolsa de papitas probablemente no es bueno.</p>

**Diay* y *di* son expresiones en Costa Rica que significan “digamos”.

Tabla 5 Comparación de patrones de razonamiento demostrados por estudiantes de Estados Unidos y Costa Rica

Patrón de razonamiento	Estados Unidos	Costa Rica
Objetivización	24% (4)	32% (7)
Principismo	29% (5)	0
Composicionismo	24% (4)	32% (7)
Interaccionismo	23% (4)	36% (8)

Los valores son porcentajes de los participantes en esa categoría del total de personas entrevistadas en cada grupo institucional, seguidos por el número de participantes entre paréntesis.

Participante: Es decir, sí, el oxígeno es importante, pero quiero saber por qué cambió.

Entrevistador: ¿Qué quieres decir que por qué cambió?

Participante: Porque, aunque estos tres son líquidos y ese es un gas, ¿por qué no sería el gas el que tendría carbono, hidrógeno y oxígeno, y no, me entiendes?

Entrevistador: Ah, OK. ¿Estás preguntando por qué el gas natural no es también un líquido?

Participante: Sí.

Entrevistador: OK. Piensas en la presencia de carbono e hidrógeno, ¿eso afecta a si algo es sólido, líquido o gas? ¿Según de lo que está hecho, eso le afecta?

Participante: Sí (EU-P6).

En la figura 3 se muestra la distribución de patrones de razonamiento por nivel de educación en las dos universidades; se observan varias diferencias entre los grupos. Se nota primeramente que los participantes de la universidad de Estados Unidos, a nivel de grado, utilizaron objetivización, mientras que los participantes de Costa Rica, a partir del 4.º año de universidad, ya no demostraron razonamiento con objetivización. En el ejemplo siguiente se muestra cómo un estudiante clasificó sustancias de forma general y que se

pueden separar en partes más pequeñas, aunque indivisibles, liberarse y afectar al medio ambiente. Es decir, el estudiante se refiere a que el petróleo se convierte en CO₂ y habla del petróleo y del CO₂ como objetos, no como sustancias químicas con propiedades.

Entrevistador: OK, cuando utilizamos combustibles, estos causan efectos en el medio ambiente, así que, pensando solo en esos efectos, ¿cuál combustible piensas que es la mejor opción?

Participante: No sé, creo que es conocimiento general que los combustibles de octano o el petróleo no son muy buenos.

Entrevistador: ¿Y por qué no son buenos?

Participante: Ponen afuera mucho CO₂. Así que, cuando se rompe, CO, no sé, parecería que el etanol, en realidad no sé cómo reaccionaría.

Entrevistador: Está bien, puedes especular. No hay respuesta incorrecta.

Participante: Parece como que, porque no sé cómo será la reacción, es difícil decir, CO₂.

Entrevistador: Entonces, ¿dijiste que el octano produce mucho CO₂?

Participante: Sí, eso parece. Bueno los productos derivados de petróleo, todos dicen, gasolina o... asumo que el octano podría ser algo similar, pone afuera muchas emisiones de CO₂, pero no sé (EU-M2).

Por otra parte, se puede observar que todos los niveles de estudiantes de grado en Estados Unidos presentan composicionismo, al igual que en Costa Rica, donde los profesores universitarios también presentan este patrón de razonamiento. Esta observación podría no significar nada debido al tamaño de la muestra, pero vale la pena hacer hincapié en esto.

En el patrón de razonamiento de composicionismo, las explicaciones se hacen con base en que las sustancias están compuestas por partes (átomos/elementos) que brindan las propiedades a la sustancia por su identidad. Un ejemplo muy común se muestra a continuación:

Entrevistador: Entonces, ¿qué piensas que pasa con el oxígeno en el etanol?

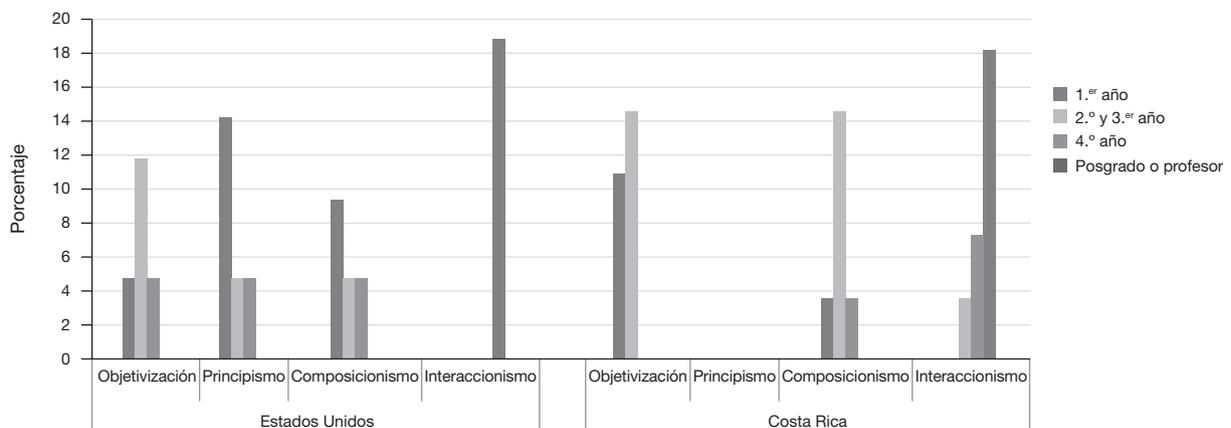


Figura 3 Porcentaje de participantes que demostraron diferentes patrones de razonamiento en los cuatro niveles de educación en cada universidad.

Tabla 6 Cantidad de entrevistas en que el participante recurre al modelo teórico específico para explicar algo

Modelo teórico	Estados Unidos (de 17 en total)	Costa Rica (de 22 en total)
Razonamiento involucrando modelo oxidación-reducción	2	3
Razonamiento involucrando teoría cinética-molecular	5	0

Participante: Simplemente hay más oxígeno para quemar, ves que se quema más fácilmente que el resto.

Entrevistador: ¿Por qué se quemaría más fácil el etanol que el resto?

Participante: Porque hay más exceso de oxígeno para quemar.

Entrevistador: OK. ¿Me puedes explicar un poco más?

Participante: Como para la combustión se necesita oxígeno para poder ejecutar la reacción completamente, si hay más oxígeno, entonces se puede quemar más del etanol.

Entrevistador: Ya veo.

Participante: Sí, entonces, quizá es más fácil usar el etanol que el petróleo.

Entrevistador: OK, y si dijera que necesitas oxígeno para que estos se quemen, ¿de dónde sale el oxígeno para estos otros combustibles?

Participante: Del medio ambiente (EU-P5).

Como se observa en el ejemplo anterior, las propiedades importantes, que ayudan a diferenciar entre los combustibles, se atribuyen a su composición. La presencia del oxígeno en el etanol lo vuelve una mejor opción, según el participante, y lo importante es que este elemento le proporciona la propiedad de quemarse más fácilmente que el resto de los combustibles.

Se puede observar de igual manera que el patrón de interaccionismo se encuentra solo en el grupo mayor nivel educativo, estudiantes de posgrado y profesores en el caso de Estados Unidos; en cambio, en Costa Rica algunos estudiantes de grado también utilizan este patrón de razonamiento. El ejemplo que se da a continuación muestra evidencia de interaccionismo y que el participante piensa en la reactividad de las sustancias como propiedad que surge de la identidad, en las posibles vías de reacción debido a las estructuras y los efectos de estas reacciones:

Entrevistador: Vamos con el último factor del que vamos a conversar y el asunto de contaminación, todos los combustibles contaminan... Pensando en reducir la contaminación, ¿cuál combustible escogerías y por qué?

Participante: Pues eso sí dependería, por lo menos estaba viendo en la parte de ciencia, sería mucho más factible usar este que, pues, octano, ¿verdad?, que sería el que, pues, prendería combus-

tión completa solamente CO₂ y agua, y de ellos dos, de las dos opciones que había, pues precisamente es mejor utilizar el que proviene de residuos de madera, precisamente, pues, para evitar el uso de combustibles derivados del petróleo, que además no sería solamente... no solamente octano, sino que puede venir mezclado con otros contaminantes, mientras que no estoy seguro si el de la madera está tal vez un poco más purificado, tal vez no tenga tantos contaminantes, como benceno o este tipo de estructuras, y sin embargo, pensando en el medio ambiente, igual el CO₂ es un gas de efecto invernadero, entonces con cualquiera de las dos opciones uno podría, ¿sí?, pues, generar, ¿verdad? Con la oxidación del octano se formaría eso, mientras que oxidando el etanol, pienso yo que formaría ácido acético y no sé si alguna otra cosa, uno evitaría, di pues, que haya un aumento de las emisiones de CO₂, y pensando en el medio ambiente seguiría siendo mi escogencia [sic] (CR-Ú1).

Por otra parte, se exploraron las diferencias curriculares más evidentes entre los países. Se observa que se introduce la teoría cinética-molecular a edades más jóvenes en Estados Unidos que en Costa Rica y que el énfasis en el modelo oxidación-reducción a lo largo el currículo universitario es más fuerte en Costa Rica que en Estados Unidos. Al analizar los patrones de razonamiento de los participantes, se contó cuántas veces al participante se le ocurrió razonar con base en estos dos modelos en todas las transcripciones de las entrevistas (tabla 6). Los recuentos en la tabla 6 señalan que las teorías con más énfasis en el currículo aparecen más en el pensamiento químico de los participantes. Esto posiblemente indique que el currículo influye en las suposiciones y afecta a los patrones de razonamiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el tamaño de la muestra es muy pequeño, por lo que sólo es una tendencia tentativa.

Pregunta de investigación 2: ¿cómo refinan los resultados de la primera pregunta de investigación la PA hipotética de la identidad química?

Durante el análisis de los datos empíricos, se ha podido revisar la PA hipotética de la identidad química. En general, el orden hipotético del nivel de experiencia de los patrones de razonamiento es acorde con el orden que se encontró en los datos empíricos presentados en la sección anterior. La figura 4 muestra que la sofisticación conceptual intuitiva coincide con principismo y objetivización en los participantes de Estados Unidos, y mayormente con objetivización en los participantes de Costa Rica. En la sofisticación conceptual híbrida, los participantes de Estados Unidos demostraron patrones de razonamiento de objetivización, principismo y composicionismo. En cambio, los de Costa Rica demostraron objetivización, composicionismo e interaccionismo. Finalmente, con la sofisticación conceptual académica, los participantes de ambas instituciones mostraron composicionismo e interaccionismo como patrones de razonamiento.

En la figura 5 se presenta la comparación entre patrones de razonamiento y modo de razonar. La tendencia general

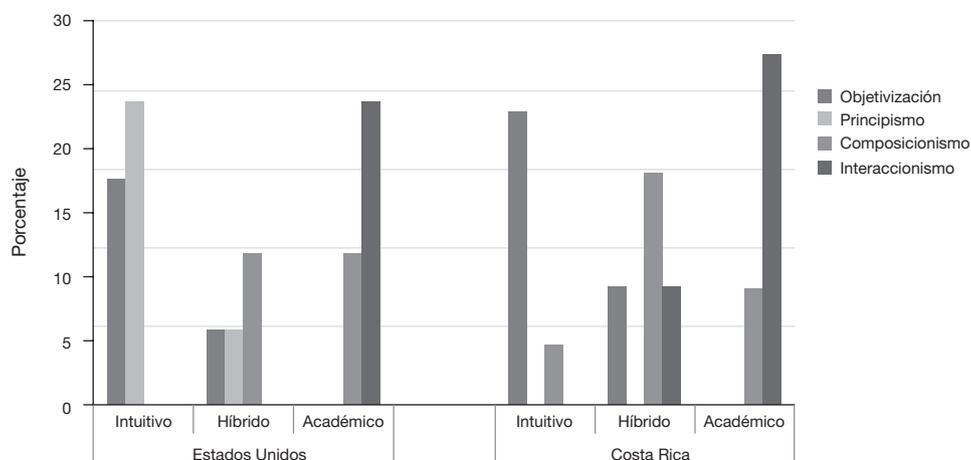


Figura 4 Porcentaje de concurrencia de códigos de patrones de razonamiento y sofisticación conceptual con participantes de Estados Unidos y Costa Rica.

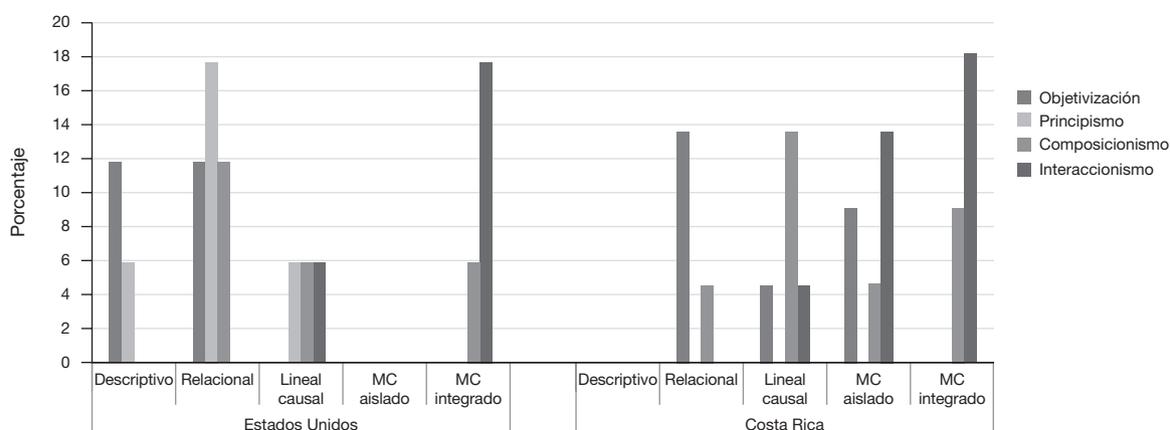


Figura 5 Porcentaje de concurrencia de códigos de patrones de razonamiento y modo de razonar con participantes de Estados Unidos y Costa Rica. MC: multicomponente.

de todos los participantes es un aumento del modo de razonar al aumentar el nivel académico (fig. 2). Los resultados de la figura 5 indican que casi cada patrón de razonamiento se usó con todos los modos de razonar. Las excepciones de lo anterior fueron el uso del patrón interaccionismo con modo relacional y de los patrones de objetivización y principismo con el modo multicomponente integrado.

La figura 6 presenta la relación entre sofisticación conceptual y modo de razonar. Los resultados son acordes con nuestro argumento presentado anteriormente (Sevian y Talanquer, 2014), en el que se señala que los expertos a veces razonan con argumentación bien sencilla, con claves relevantes de la química, pero cuando se los pone a prueba usan argumentos multicomponentes con modelos científicos relevantes para explicar los fenómenos.

El análisis también ayudó a ver que a veces un patrón de razonamiento más novato es suficiente para entender un concepto, y entonces sirve como punto productivo en el pensamiento químico, y a su vez está en línea con los resultados de otros estudios en el tema de progresiones de

aprendizaje (Gunckel, Covitt, Salinas y Anderson, 2012; Mohan, Chen y Anderson, 2009). En el caso del siguiente ejemplo, el patrón de razonamiento de objetivización fue suficiente para que el estudiante llegara al razonamiento correcto sobre el punto de ebullición. Este es un punto productivo en el pensamiento químico y no hace falta tener un patrón de razonamiento más avanzado.

Participante: Porque... no sé, es una molécula más sencilla; el octano, al ser más larga, tiene como mayor punto de ebullición, entonces siento como que se va a necesitar más energía para poder quemarlo. Sigo con el metano.

Entrevistador: OK, bueno, ¿consideras que esta información es importante para tomar la decisión?

Participante: Sí.

Entrevistador: ¿Por qué?

Participante: Con respecto a la estructura, para ver, digamos, como los puntos de ebullición a la hora de la combustión del combustible, digamos, para el carro.

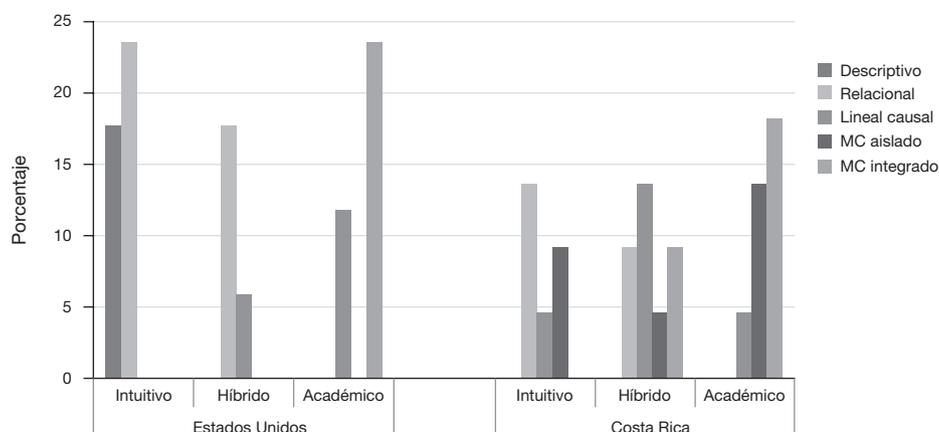


Figura 6 Porcentaje de concurrencia de códigos de sofisticación conceptual y modo de razonar con participantes de Estados Unidos y Costa Rica. MC: multicomponente.

Entrevistador: ¿Consideras que es importante saber el punto de ebullición para la combustión?

Participante: Sí (CR-M1).

También se pudo aclarar más cuáles son las diferencias entre principismo y composicionismo, y hasta definir mejor sus significados. Hay dos aclaraciones que vale la pena mostrar. Primero, ambos patrones pueden contener razonamiento sobre las propiedades de sustancias que vienen de los componentes. Sin embargo, en el principismo, la propiedad determina la composición, mientras que en el composicionismo se ve al revés. Por ejemplo, en el extracto del participante EU-P6 en la sección de la pregunta de investigación 1, que muestra el patrón principismo, las propiedades están asociadas a los componentes, pero existen principios que se puede añadir o quitar de una sustancia (p. ej., la natural “liquidez” o “vaporosidad” de una sustancia). La mayoría de las ocurrencias vistas de razonamiento debido a los componentes, sin embargo, fueron casos en que una propiedad se consideró atada a un componente específico, como en el ejemplo del extracto de EU-P5, en la misma sección, en que la propiedad de reactividad se asoció con la existencia de oxígeno como componente de la sustancia.

La segunda aclaración sirvió para agudizar la especificación de “componente” en el patrón de composicionismo, para que incluya los enlaces como bloques de construcción también considerados en relación con las propiedades. Por ejemplo, el participante a continuación se refirió a los enlaces moleculares como si estos le dieran propiedades a la materia, más allá de considerar solo los átomos que componen una sustancia. Esto indica que había que modificar la definición de composicionismo para que incluyera los enlaces y los átomos como partes constituyentes de entidades químicas que llevan las propiedades de la sustancia.

Entrevistador: Así es como están organizadas las partículas en los combustibles. Ahora, sabiendo esto, ¿le parece importante?

Participante: Siento que sí, porque le ayuda como a ejemplificar precisamente lo que le decía anteriormente para la combustión, va a ser más difícil romper todas estas cadenas tan largas que romper

una cadena más corta como estas dos; entonces, siento que es; si ayuda porque ayuda a ilustrar, ya que se ve de verdad lo difícil que puede ser romper una cadena de octano; en cambio, una de etanol va a ser más sencillo, igual una de metano, igual me sigo quedando con el del etanol por lo que le dije anteriormente, por la presencia de oxígeno y que es líquido y todo eso, entonces sí siento que ayuda, para ilustrar básicamente (CR-M6).

Uno de nuestros objetivos era poder separar estas ideas principales, pero durante el análisis encontramos que esta separación no es fácil de hacer. Observamos que todos los participantes, de las dos universidades, hablaron de los beneficios, costos y riesgos de usar diferentes sustancias. Es posible que el pensamiento de identidad química estuviera implícito en las respuestas que fueron catalogadas como beneficios-costos-riesgos. El análisis de los extractos con esta información está en progreso y se presentará en una publicación futura.

Discusión

Diversidad de pensamiento químico sobre identidad química

La investigación presentó la oportunidad de validar y refinar la PA de identidad química, pero surgieron diferencias entre los estudiantes y profesores de Costa Rica y los de Estados Unidos. De la misma manera que una PA lleva la intención de alinear el currículo, la enseñanza y la evaluación, la investigación de una PA puede aclarar cómo diferencias entre estas tres condiciones pueden afectar a las PA de estudiantes que están involucrados en los diferentes contextos mencionados. En esta investigación, hubo diferencias entre los planes de estudio de uno y otro país. Seguramente hay diferencias entre las culturas, las normas y otras variables de las sociedades que pueden influir en las trayectorias de los estudiantes a lo largo de la PA, o la PA misma, pero no tenemos

suficientes detalles para afirmarlo. En esta investigación, nos enfocamos en tres diferencias principales.

Estudiamos tres variables que describen el razonamiento de estudiantes y profesores de química mientras tenían que elegir una de varias opciones de combustibles para un propósito: sofisticación conceptual (la naturaleza de las suposiciones sobre la estructura y las propiedades de la materia y los fenómenos), modos de razonar (la complejidad de razonar en términos de la capacidad de conectar ideas, construir justificaciones, hacer decisiones y desarrollar explicaciones) y patrones de razonamiento sobre la identidad química (maneras de pensar sobre la identidad de una sustancia y las propiedades que la diferencian de otras). En la mayoría de los casos, se observó que los estudiantes de la universidad en Costa Rica razonaron con sofisticación conceptual más alta, modos de razonar más complejos y patrones de razonamiento más avanzados que los estudiantes de la universidad en Estados Unidos.

Como ya se explicó en la sección sobre antecedentes, hay diferencias entre los currículos de los dos países, tanto preuniversitarios como universitarios, que pueden explicar, al menos parcialmente, las diferencias observadas. En Costa Rica se da más importancia a la química industrial que en Estados Unidos. También hay diferencias de énfasis y edad de introducción de diferentes modelos científicos en el currículo. Esto se evidencia al considerar la cantidad de ocasiones en que los participantes utilizaron los modelos identificados en la tabla 6, concordantes con los planes de estudio de sus países y su nivel académico.

No empleamos una forma alternativa para medir el conocimiento del contenido de química en este trabajo, así que solo podemos especular sobre los orígenes de estas diferencias basadas en la información descriptiva sobre la población general de estudiantes en cada lugar y las misiones de cada institución. La universidad en Costa Rica que participó en la investigación es la universidad con el mejor *ranking* en Centroamérica. Por otro lado, la universidad en Estados Unidos que participó en la investigación, aunque también es una universidad pública, tiene una reputación y una misión muy diferentes. Es la única universidad pública en una ciudad que alberga varias universidades muy aclamadas por ser instituciones exclusivas en el país. También, aunque sea una universidad clasificada como de investigación-intensiva, es un campus secundario del sistema universitario, sin alojamiento para estudiantes y con una mezcla de población estudiantil tradicional y no tradicional. Por eso, es posible que haya diferencia en la distribución del calibre de las poblaciones estudiantiles de las dos universidades, lo que puede explicar parte de las diferencias entre las dos poblaciones.

Finalmente, durante las entrevistas los autores observaron diferencias señaladas por los participantes en términos de la familiaridad con dos de los combustibles. En Costa Rica, la mayoría no reconoció el combustible E85, aunque lo pudieran imaginar como un combustible útil hecho de etanol (p. ej., algunos conocían su uso y sus propiedades, pero no lo usaban realmente), mientras algunos de los estudiantes en Estados Unidos estaban familiarizados con el combustible E85 que está disponible en las gasolineras. También, en Costa Rica el gas combustible en el laboratorio de química es una mezcla de propano y butano, mientras que en Estados Unidos es metano. Todos los participantes habían tomado, por lo menos, un curso en el laboratorio de química en

el que se requiere entrenamiento de seguridad e incluye el aprendizaje de qué tipo de gas hay en el laboratorio. Además, en Estados Unidos es común usar el metano como combustible de cocina, pero en Costa Rica se usa también una mezcla de propano y butano. Entonces, es posible que, respecto a estos dos combustibles, la entrevista era más un ejercicio teórico para los participantes de Costa Rica que para los de Estados Unidos.

Implicaciones didácticas

La especulación de Ngai, Sevia y Talanquer (2014) sobre la prevalencia del composiciónismo en los estudios revisados y analizados para derivar la PA hipotética era que, al principio de la escuela secundaria o universitaria (dependiendo del país), existe un cambio de enfoque para hacer énfasis en los componentes de sustancias, en lugar de cómo diferenciarlas. Esos autores también especularon que este cambio tiene un efecto profundo en el pensamiento de los estudiantes, de manera que dan preferencia a explicaciones con base en la composición sobre todo lo demás, por lo cual es difícil darse cuenta de que tiene límites. El composiciónismo es, por ejemplo, suficiente para resolver los problemas relacionados con la estequiometría, porque la unidad de análisis son los átomos o grupos de átomos (p. ej., los iones o los grupos funcionales). Del mismo modo, los problemas relacionados con la entalpía de reacción también se pueden considerar desde el punto de vista de romper y formar enlaces, por lo que también se queda en el patrón del composiciónismo, tomando en cuenta la revisión de este patrón basada en nuestros resultados. Por lo tanto, se puede utilizar el composiciónismo sin requerir llegar al interaccionismo. Se recomienda, entonces, comenzar a hacer hincapié en los problemas que requieren patrones de pensamiento de interaccionismo antes en el plan de estudios, para generar una necesidad de calificar cuándo el composiciónismo es relevante para la consideración de los problemas.

El pensamiento de beneficios-costos-riesgos es más importante para los estudiantes de lo que se podría haber predicho. La identidad química se puede enseñar a través de la ventana de beneficios-costos-riesgos de varias maneras si se aprovecha lo que se aprendió, y se puede encontrar otras vías para formular preguntas, mediante las que el aprendizaje del estudiante se pueda beneficiar. Como se ha presentado en otro lugar (Sevia y Bulte, 2014), este enfoque constituiría un énfasis curricular con mayor relevancia en los mundos vividos por los estudiantes. Por medio de un problema que invoca el pensamiento de beneficios-costos-riesgos, es posible formular preguntas para dirigir a los estudiantes a pensar en cómo diferenciar entidades químicas, para desarrollar su entendimiento de clasificar sustancias en categorías útiles, y para distinguir entre sustancias por sus propiedades relevantes. Las dos metas son centrales al desarrollar facilidad para practicar la química con comprensión más profunda del concepto macroscópico de sustancia. Según el ejemplo ya mencionado, en el caso de elegir un combustible que sea menos perjudicial para el medio ambiente, si un estudiante dice: "No usaría octano porque causa contaminación", el profesor tiene varias opciones para estimular al estudiante a pensar con más profundidad. El profesor podría desafiar al estudiante a pensar en términos de identidad química,

haciendo preguntas como: “Entonces, si un combustible causa contaminación, ¿significa que era octano?”, o también podría orientar el pensamiento hacia relaciones de estructura-propiedades con preguntas como: “¿Hay otros combustibles que también causan contaminación?”. De manera que, si el objetivo es desarrollar el pensamiento sobre identidad química, es importante preguntar sobre las propiedades que se usan para distinguir entre las diferentes clases de sustancias.

Limitaciones

Se logró progreso en el refinamiento de la especificidad conceptual de una PA sobre identidad química que describe patrones de razonamiento que están presentes en poblaciones de estudiantes de los dos países. Se mostró que la sofisticación conceptual del pensamiento sobre identidad química generalmente aumenta con el nivel educativo, y la sofisticación conceptual y los modos de razonamiento pueden variar entre poblaciones. Es necesario, sin embargo, notar las limitaciones del estudio y los esfuerzos que se realizaron para considerar tales limitaciones.

Reconocemos que trabajamos con un número pequeño de participantes, por lo que es necesario continuar validando la PA con un número mayor para cada uno de los distintos niveles académicos. Estamos recolectando más entrevistas con estudiantes de cada nivel educativo en las dos universidades para validar de mejor manera la PA. También, es necesario obtener más información, independientemente de las entrevistas, sobre el rendimiento académico de los estudiantes de Química.

Además, una segunda limitación reside en la naturaleza de nuestras preguntas. Para continuar, tenemos que realizar más preguntas durante las entrevistas, que estén orientadas a aclarar lo que los participantes dicen, con el fin de recolectar más información y así tener una mejor idea de lo que el participante está pensando (como identidad química o estructura-propiedades), sus conocimientos químicos y la forma en que los relaciona para obtener sus conclusiones o hacer sus comentarios.

Conclusiones

La investigación anterior permite mostrar cómo luce el razonamiento de identidad química y que además se puede usar como parte del razonamiento de beneficios-costos-riesgos. Además, muestra que a veces no hace falta tener un patrón de razonamiento muy avanzado, ya que se puede explicar lo que se quiere con un patrón de razonamiento más simple. Por ejemplo, el participante CR-M1 sabía datos de química, pero solo demostraba razonamiento sobre sustancias al nivel de la materia como objeto, es decir, el patrón de objetivización. En este caso, la objetivización bastó al estudiante para llegar al razonamiento correcto sobre el punto de ebullición. Este es un punto productivo en el pensamiento químico y no hace falta tener un patrón de razonamiento más avanzado. Estos resultados coinciden con otros reportados por investigadores de PA en ciencias (Gunckel et al., 2012; Mohan et al., 2009).

Por otra parte, a partir de este análisis, se comprendió más la diferencia entre los dos patrones intermedios de la PA, principismo y composicionismo. En el principismo, las propiedades son vistas como algo que se puede separar de las sustancias y, por tener esas propiedades, las sustancias tienen una identidad determinada. En el composicionismo, las partes determinan las propiedades y, por lo tanto, también la identidad de las sustancias. A su vez, la definición de composicionismo puede expandirse, porque algunos participantes hablaron sobre los enlaces y cómo estos dan propiedades a los materiales. Con esto decidimos refinar la definición de composicionismo y expandirla para incluir no solo átomos, sino también enlaces. Al aclarar estos patrones de razonamiento, se aclara más la PA.

Además, es importante destacar que el razonamiento en identidad química es muy similar entre los estudiantes de Costa Rica y los de Estados Unidos, por lo que se valida la PA a nivel más global. Aun así, se reconoce que existen diferencias entre las maneras de pensar y estas se atribuyen a implicaciones de currículo, el calibre de la población estudiantil de la universidad e instrucciones relacionadas con la posición geográfica (a nivel social, cultural y de realidad económica).

Agradecimientos

Agradecemos a Steven Cullipher y a Courtney Ngai por ayudar en coleccionar entrevistas y por muchas conversaciones críticas durante el análisis de los datos. 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. Finalmente, agradecemos a todos los participantes, estudiantes y profesores, de las dos universidades, que nos regalaron su tiempo para realizar este estudio.

Financiación

Otorgaron fondos para nuestras investigaciones: US NSF 1222624 y la AAAS WIRC@MSIs.

ANEXO 1 PROTOCOLO DE LA ENTREVISTA “GOKARTS”

Se presenta la entrevista al participante una página cada vez. Primero, hay una presentación del contexto del problema. Después, cada siguiente página introduce nueva información sobre los combustibles, y se invita al participante a explicar su elección tomando en cuenta la nueva información.

Texto de la primera página: Presentación del problema

Un parque de diversiones te ha contratado para diseñar un GoKart (un pequeño automóvil de motor). Durante la etapa

de diseño, tienes que elegir un combustible para hacer que el GoKart ande. Estás considerando cuatro tipos de combustible. El primero es gasolina, también conocido como octano, que es un derivado del petróleo. El segundo combustible también es gasolina, pero derivada de pedazos de madera. El tercer combustible es gas natural, también conocido como metano. Finalmente, también estás considerando E85, que está compuesto mayormente de etanol.



Fuente: Jenny Zhang/123rf.com.

Considerando que todos los combustibles cuestan lo mismo por litro, ¿qué combustible elegirías para usar con el GoKart? ¿Por qué? Por favor explica tus razones y qué es lo que te parece importante.

¿Qué combustible sería el mejor? Los nombres químicos están entre paréntesis:

- Gasolina extraída de petróleo (octano)
- Gasolina extraída de pedazos de madera (octano)
- Gas natural (metano)
- E85 (etanol)

Texto de la segunda página:

La disponibilidad de los combustibles

Resulta que estos combustibles están disponibles de diferentes estados físicos. Las gasolinas derivada de petróleo y pedazos de madera están disponibles de forma líquida. El gas natural está disponible en forma de gas y el E85 está disponible de forma líquida.

Gasolina extraída de petróleo (octano)	Gasolina extraída de pedazos de madera (octano)	Gas natural (metano)	E85 (etanol)
Líquido	Líquido	Gas	Líquido

¿Piensas que esta información es importante para ayudarte a tomar una decisión acerca de qué combustible sería mejor para el GoKart? ¿Te ayuda esta información para tomar tu decisión? ¿Cambia tu decisión? Por favor, explica tu razonamiento.

Texto de la tercera página:

Componentes de los combustibles

Resulta que sabemos de qué están hechos estos combustibles. La gasolina derivada de petróleo y la de pedazos de madera están hechas de carbono e hidrógeno. El gas natural también está hecho de carbono e hidrógeno. El E85 está hecho de carbono, hidrógeno y oxígeno.

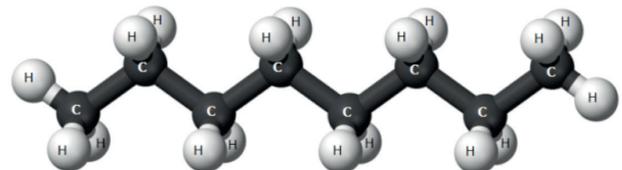
Gasolina extraída de petróleo (octano)	Gasolina extraída de pedazos de madera (octano)	Gas natural (metano)	E85 (etanol)
Carbono e hidrógeno	Carbono e hidrógeno	Carbono e hidrógeno	Carbono, hidrógeno y oxígeno

¿Piensas que esta información es importante para ayudarte a tomar una decisión acerca de qué combustible sería mejor para el GoKart? ¿Te ayuda esta información para tomar tu decisión? ¿Cambia tu decisión? Por favor, explica tu razonamiento.

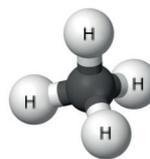
Texto de la cuarta página:

Las partículas que componen los combustibles

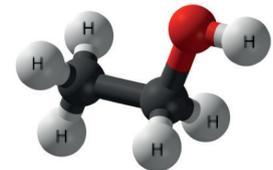
Resulta que sabemos cómo están organizadas las partículas de estos combustibles. Aquí están los dibujos de cómo están conectadas las partículas.



Octano



Metano



Etanol

¿Piensas que esta información es importante para ayudarte a tomar una decisión acerca de qué combustible sería mejor para el GoKart? ¿Te ayuda esta información para tomar tu decisión? ¿Cambia tu decisión? Por favor, explica tu razonamiento.

Texto de la quinta página: Contaminación

Cuando los combustibles se utilizan en motores, pueden causar contaminación.

Pensando de qué manera pueden estos combustibles afectar al medioambiente, ¿cuál de estos combustibles piensas que es mejor usar? Por favor, justifica tu respuesta y explica tu razonamiento.

ANEXO 2 CURRÍCULO DE QUÍMICA DE LAS DOS UNIVERSIDADES

Es importante describir y comparar los programas de pregrado de Química en ambas universidades. En la universidad de Estados Unidos, los alumnos tienen que tomar los siguientes cursos para obtener un título en Química, usualmente en cuatro años: Química General, Química Orgánica, Química Inorgánica, Química Analítica, Físico-Química y Bioquímica. Además, los estudiantes deben hacer investigación original en un grupo de investigación del Departamento de Química y presentar los resultados oralmente y por escrito. También los estudiantes deben desarrollar una comprensión de Química Verde y responsabilidad hacia el medio ambiente.

En la universidad de Costa Rica, los cursos son casi los mismos que en la universidad de Estados Unidos, con la diferencia de que los estudiantes toman más semestres de Química Inorgánica y no se requiere que tomen Bioquímica. En total, la carrera usualmente toma cinco años. La Química Verde es parte del temario de varios cursos a lo largo de la carrera (General, Orgánica e Inorgánica). Para optar por el bachillerato en Química, los estudiantes deben aprobar tres cursos optativos en Química que pueden estar relacionados con diversos temas, que sirven como especialización (p. ej., para trabajar en la industria, investigación, análisis o síntesis, entre otros). No es necesario presentar una tesis para graduarse de Bachiller en Química y ejercer su profesión (para Licenciatura, correspondiente al quinto año, sí se realiza tesis); sin embargo, son requisito haber laborado durante un semestre en la industria química del país, ya sea en empresas públicas o privadas, y haber tomado cursos específicos de procesos industriales (teóricos y prácticos).

Finalmente, en Costa Rica es requisito para obtener el título de Bachiller en Química aprobar dos “seminarios de sección”, correspondientes a cursos en los que se lleva a cabo una revisión bibliográfica relacionada con los tópicos más recientes de la investigación en las diferentes áreas de la Química, así como dos seminarios relacionados con la realidad del país y 300 horas de trabajo comunal. Además, a partir del tercer año, los estudiantes de Química pueden integrarse en proyectos de investigación y también pueden ser asistentes de laboratorio, colaborando con la instrucción de estudiantes más jóvenes, revisión de evaluaciones, etc., bajo la tutela de un docente. En la universidad de Estados Unidos, los estudiantes tienen que completar una tesis basada en el trabajo que hacen en un laboratorio de la universidad.

Es importante destacar que las estructuras de la educación superior en Estados Unidos y Costa Rica son diferentes. En Costa Rica, los estudiantes deciden a qué carrera ingresar desde su primer año de universidad y siguen un plan de estudios para convertirse, por ejemplo, en químicos profesio-

sionales. En cambio, en Estados Unidos los estudiantes tienen opción de cambiar su elección de carrera según avanzan en su preparación académica. Además, muchos estudiantes en carreras relacionadas a la medicina y todas las ciencias deben tomar química. Por lo tanto, no todos los estudiantes siguen el mismo plan de estudios.

Referencias

- Ary, D., Jacobs, L.C., y Razavieh, A. (2002). *Introduction to Research in Education* (6.ª ed.). Belmont, California: Wadsworth/Thomson Learning.
- Brown, D. (1993). Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change. *Journal of Research in Science Teaching*, 20, 1273-1290.
- Brown, D.E., y Hammer, D. (2008). Conceptual change in physics. En Vosniadou, S. (editor), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 127-154). Nueva York: Routledge.
- Chi, M.T.H. (2008). Three kinds of conceptual change: belief revision, mental model transformation, and ontological shift. En Vosniadou, S. (editor), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 61-82). Nueva York: Routledge.
- DiSessa, A.A. (2008). A bird's eye view of the 'pieces' versus 'coherence' controversy (from the 'pieces' side of the fence). En Vosniadou, S. (editor), *International handbook of research on conceptual change* (pp. 35-60). Nueva York: Routledge.
- Fiske, S.T., y Taylor, S.E. (2008). *Social cognition from brains to culture*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Gunckel, K.L., Covitt, B.A., Salinas, I., y Anderson, C.W. (2012). A learning progression for water in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 49, 843-868.
- Hatano, G., y Inagaki, K. (2000). Domain-specific constraints of conceptual development. *International Journal of Behavioral Development*, 24, 267-275.
- Jin, H., y Anderson, C.W. (2012). Developing assessments for a learning progression on carbon-transforming processes in socioecological systems. En Alonzo, A., y Gotwals, E. (editoras). *Learning progressions in science* (pp. 151-181). Rotterdam: Sense Publishers.
- Keil, F.C. (1990). Constraints on constraints: Surveying the epigenetic landscape. *Cognitive Science*, 14, 135-168.
- Maeyer, J., y Talanquer, V. (2013). Making predictions about chemical reactivity: Assumptions and heuristics. *Journal of Research in Science Teaching*, 50, 748-767.
- Mohan, L., Chen, J., y Anderson, C.W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46, 675-698.
- 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, 2438-2461. doi 10.1080/09500693.2014.927082
- Patton, M.Q. (2002). *Qualitative research and evaluation methods* (3.ª ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
- Redish, E.F. (2004). A theoretical framework for physics education research: modeling student thinking. En Redish, E.F., y Vicentini, M. (editores). *Proceedings of the International School of Physics, "Enrico Fermi" Course CLVI*. Amsterdam: IOS Press.
- Szteinberg, G., Balicki, S., Banks, G., Clinchot, M., Cullipher, S., Huie, R., ..., y Sevian, H. (2014). Collaborative professional development in chemistry education research: Bridging the gap between research and practice. *Journal of Chemical Education*, 91, 1401-1408. doi 10.1021/ed5003042
- Sevian, H., y Bulte, A.M.W. (en prensa). Learning chemistry to enrich students' views on the world they live in. En Eilks, I., y Hofstein, A. (editores). *Relevant chemistry education: From research to practice*. Rotterdam, Netherlands: Sense Publishers.

- Sevian, H., Ngai, C., Szteinberg, G., Brenes, P., y Arce, H. (en prensa). 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.
- Sevian, H., y Talanquer, V. (2014). Rethinking chemistry: A learning progression on chemical thinking. *Chemistry Education Research and Practice*, 15, 10-23.
- Spelke, E.S., y Kinzler, K.D. (2007). Core knowledge. *Developmental Science*, 10, 89-96.
- Stavy, R., y Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York: Teachers College Press.
- Talanquer, V. (2005). El químico intuitivo. *Educación Química*, 16, 540-547.
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of structure of matter. *International Journal of Science Education*, 31, 21-23.
- Talanquer, V. (2013). School chemistry: the need for transgression. *Science & Education*, 22, 1757-1773.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, 45-69.
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X., y Skopeliti, I. (2008). The framework theory approach to the problem of conceptual change. En Vosniadou, S. (editor). *International handbook of research on conceptual change* (pp. 3-34). New York: Routledge.