

Análisis Estructural de una Analogía para la Enseñanza de la Estequiometría Química: posibilidades y limitaciones

Alexandre da Silva Ferry 

Departamento de Educação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Brasil. alexandreferry@cefetmg.br

Luciana Paula de Assis 

Programa de Pós-graduação em Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Brasil. lucianapauladeassis@gmail.com

[Recibido: 13 febrero 2023. Revisado: 27 marzo 2023. Aceptado: 30 junio 2023]

Resumen: Esta investigación tuvo como objetivo analizar de manera estructural, semántica y pragmática una analogía utilizada en la enseñanza de la estequiometría en libros de texto brasileños: la comparación entre relaciones de proporción fija entre reactivos y productos en reacciones químicas y entre ingredientes en una receta culinaria. El análisis incluyó la revisión de los capítulos de seis libros de texto que tratan el tema de la estequiometría, la identificación de la estructura de la analogía, su caracterización en términos estructurales, semánticos y pragmáticos y la evaluación de su presentación en los libros de texto. Los resultados del análisis muestran que la analogía, presente en tres de los libros analizados, tiene un potencial analógico para la enseñanza de la estequiometría, ya que su estructura se enfoca más en la relación que en la descripción y es consistente estructuralmente, además de tener similitudes en los significados contextuales entre las correspondencias identificadas. La conclusión del trabajo sugiere que, aunque los autores de los libros analizados no han aprovechado todas las correspondencias identificadas en la estructura relacional de esta analogía, ofrece una amplia gama de posibilidades didácticas para la enseñanza de la estequiometría, incluyendo la enseñanza de conceptos de proporción entre reactivos y productos, reactivos en exceso y limitantes, pureza y rendimiento en procesos químicos.

Palabras clave: Enseñanza de la química; Analogía; Estequiometría; Mapeo estructural.

Structural Analysis of an Analogy for Teaching Chemical Stoichiometry: possibilities and limitations

Abstract: This research aimed to analyze an analogy used in the teaching of stoichiometry in Brazilian textbooks from a structural, semantic, and pragmatic perspective. The analogy being studied compares the fixed proportional relationships between ingredients in a cooking recipe to the relationships between reactants and products in chemical reactions. The analysis involved a review of the chapters in six textbooks that covered the topic of stoichiometry, an identification of the structure of the analogy, its characterization in structural, semantic, and pragmatic terms, and an evaluation of its presentation in the textbooks. The results showed that the analogy, present in three of the analyzed textbooks, has the potential to aid in the teaching of stoichiometry. This is because its structure focuses on the relationships between elements rather than simply describing them, and it is structurally consistent and has similarities in the contextual meanings between the mapped correspondences. The conclusion of the study suggests that although the authors of the analyzed textbooks have not fully explored all of the correspondences identified in the relational structure of the analogy, it offers a wealth of educational opportunities for teaching stoichiometry. This includes teaching concepts such as proportions between reactants and products, equation balancing, excess and limiting reactants, purity, and yield in chemical processes.

Keywords: Chemistry teaching; Analogy; Stoichiometry; Structure-mapping.

Para citar este artículo: Ferry, A. da S. y Assis, L. P. de (2024) Análisis Estructural de una Analogía para la Enseñanza de la Estequiometría Química: posibilidades y limitaciones. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 21(1), 1202. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i1.1202

Introducción

El estudio de la Química puede aportar a la formación de ciudadanos críticos y conscientes de los fenómenos que les rodean (Costa y Souza, 2013). Sin embargo, debido a la complejidad de los temas y conceptos en este componente curricular, a menudo su enseñanza se limita a la simple transmisión de información y conceptos aislados, exigiendo a los estudiantes, por lo general, la memorización de conceptos y descripciones (Gomes y Macedo, 2007). Se presta poca atención al desarrollo del contenido procedimental y a la dimensión contextual de lo que se pretende enseñar. La mera memorización no implica un aprendizaje efectivo, por lo que muchos estudiantes finalizan la educación básica sin comprender realmente los conceptos, procedimientos y fenómenos químicos. En este contexto, se destaca la enseñanza de la estequiometría, que ha sido considerada, por muchos docentes, un desafío educativo debido a las dificultades que presentan los estudiantes al abordar este tema de contenido.

El término *estequiometría* fue propuesto por el químico alemán Jeremias Benjamin Richter en 1792 y tiene un origen griego, derivado de los términos *stoicheon* (elemento) y *metron* (medida). Es un área de estudio que se concentra en las medidas de los elementos químicos en sustancias (Gomes y Macedo, 2007). En la actualidad, la estequiometría se aborda de manera más amplia en el aula, incluyendo el estudio de las reacciones y ecuaciones químicas de manera cualitativa y cuantitativa, además de las leyes del peso, la ley de conservación de la masa, el concepto de masa molar, la cantidad de materia, el mol, la constante de Avogadro, las ecuaciones de balance, el exceso de reactivos, los reactivos limitantes, el grado de pureza y el rendimiento de los procesos químicos. A pesar de la amplia gama de subtemas, el estudio de la estequiometría en la educación básica brasileña se considera un desafío para la enseñanza de la Química. La estequiometría requiere la transición constante entre tres dominios del sujeto: el descriptivo y funcional (macroscópico), el simbólico (representacional) y el explicativo (microscópico) (Santos y Silva, 2013). Además, se enseña convencionalmente de manera algorítmica a través de ejercicios, pero a menudo los estudiantes no comprenden su contenido (Ramírez et al., 2009).

Paralelamente a estos cuestionamientos, es importante tener en cuenta que, como en casi todos los temas y conceptos de la Química, la estequiometría de reacciones y soluciones es un contenido que se aborda principalmente a través de los libros de texto. Al menos en Brasil, los libros de texto siguen siendo considerados los principales instrumentos utilizados por profesores y estudiantes en el proceso de enseñanza y aprendizaje, y en ocasiones, son el único material didáctico disponible en el espacio social del aula (Silva et al., 2010; Bernardino et al., 2013). Debido a esta situación en la enseñanza de la Química, en la investigación sobre el uso de analogías en los libros de texto, la Estequiometría frecuentemente aparece entre los temas que más utilizan este recurso mediador. Por ejemplo, Monteiro y Justi (2000) identificaron que este tema era el cuarto con el mayor número de analogías presentes en once colecciones de libros de texto de Química brasileños de la década de 1990. Datos similares fueron publicados en estudios posteriores, como el trabajo de Francisco Junior (2009), quien presentó a la estequiometría como la cuarta materia con el mayor número de analogías en seis libros de texto de Química analizados, y Silva et al (2010), quienes la situaron en el quinto lugar con el mayor número de analogías entre diez temas de contenido analizados.

Con base en las conclusiones de Raviolo y Lerzo (2016), quienes se dedicaron a investigar el efecto del uso de analogías en el aprendizaje de la estequiometría química, se evidencia

que el uso de analogías representa una estrategia promisorio en la enseñanza de este contenido. Según los autores, este enfoque permite diversificar la metodología de enseñanza, promover la motivación de los estudiantes y establecer conexiones entre los conceptos químicos y la vida cotidiana. Sin embargo, para ellos es fundamental encontrar un equilibrio en el uso de las analogías, evitando tanto su desvalorización como su uso excesivo, que puede resultar en confusión. Aunque las analogías han demostrado su eficacia en la construcción de conceptos específicos, como la fórmula química, el coeficiente estequiométrico y el subíndice, su uso no necesariamente ha garantizado mejores resultados para resolver problemas conceptuales más complejos, que requieren una comprensión más profunda de las relaciones entre las cantidades experimentales y los coeficientes estequiométricos. Por lo tanto, según Raviolo y Lerzo (2016), se recomienda complementar el uso de analogías con enfoques que impliquen trabajar con representaciones de partículas, con el fin de mejorar la comprensión de los estudiantes. Estas conclusiones destacan la importancia de un enfoque integrado y sistemático, que promueva reflexiones metacognitivas y explore recursos adicionales, como experimentos, animaciones y simuladores, para ayudar a los estudiantes a construir imágenes mentales y profundizar su comprensión de los conceptos estequiométricos (Raviolo y Lerzo, 2016).

En estudios previos, los autores Raviolo y Lerzo abordaron el uso de analogías en la enseñanza de la estequiometría química. Su investigación destacó la importancia de emplear analogías apropiadas basadas en el conocimiento de la Didáctica de las Ciencias. Raviolo y Lerzo (2014) enfatizaron la necesidad de evitar confusiones o concepciones alternativas al utilizar analogías, así como el uso adecuado de las imágenes. Asimismo, resaltaron la importancia de profundizar en la comprensión del significado de la ecuación química. En el estudio de Raviolo et al., (2014), se propusieron secuencias de enseñanza fundamentadas en reflexiones de la didáctica de las ciencias, con el objetivo de motivar a los estudiantes y diversificar las metodologías de enseñanza de la estequiometría. Hicieron hincapié en la comprensión del reactivo limitante, las fórmulas químicas y la ecuación química como elementos clave a ser abordados mediante analogías. Estas consideraciones brindan información relevante para el uso efectivo de analogías en la enseñanza de la estequiometría química (Raviolo y Lerzo, 2014; Raviolo et al., 2014).

Considerando este contexto, el objetivo de este trabajo es investigar el uso de la analogía de la *receta culinaria* en la enseñanza de la estequiometría en los libros de texto de Química. Específicamente, nuestro objetivo es analizar cómo se ha presentado esta analogía para el enfoque de las relaciones de proporcionalidad fija entre reactivos y productos en la ocurrencia de reacciones químicas. Por lo tanto, en este artículo nos proponemos responder las siguientes preguntas: (i) en términos estructurales, semánticos y pragmáticos, ¿cómo se caracteriza la comparación entre las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas y la preparación y horneado de pasteles basados en una receta culinaria?; (ii) ¿cómo se configura el potencial analógico de esta comparación?; (iii) ¿cómo se ha abordado esta comparación en los libros de texto de Química?; (iv) ¿qué posibilidades didácticas ofrece esta comparación para la enseñanza de la estequiometría? Para ello, presentamos una breve fundamentación teórica con los principales conceptos abordados en el análisis de los resultados, así como la lectura e identificación del propósito contextual de la analogía de la Receta de la Torta en seis libros de texto de Química ampliamente difundidos en las escuelas públicas de educación básica brasileña dirigidos a estudiantes de nivel de educación secundaria. Durante el estudio, se llevó a cabo el mapeo de la estructura de esta analogía, así como el análisis de su potencial analógico y la forma en que se ha presentado en cada uno de estos libros.

Marco Teórico

Según nuestro marco teórico, las analogías son comparaciones que implican correspondencias relacionales entre dos dominios diferentes, uno familiar y conocido, llamado dominio base (DB), y otro desconocido o poco conocido, llamado dominio objetivo (DO) (Gentner, 1983). Para el autor, para que una comparación sea considerada una analogía, debe presentar un enfoque relacional. Por lo tanto, las correspondencias entre relaciones similares deben ser más numerosas y/o relevantes que las correspondencias entre los atributos (predicados descriptivos) de elementos similares entre la base y el objetivo.

Gentner (1983), con algunas actualizaciones en Gentner y Markman (1997), propuso la Teoría del Mapeo Estructural (TME), la cual presenta criterios de clasificación para diferentes tipos de comparación: analogía, similitud de mera apariencia, similitud literal, abstracción, anomalía, metáfora relacional y metáfora basada en atributos. Las analogías, a diferencia de las comparaciones de mera apariencia y similitudes literales, implican un mayor número de correspondencias entre relaciones y pocas correspondencias entre atributos similares entre el DB y el DO. En cuanto a las metáforas, las analogías son comparaciones más explícitas, por lo que las correspondencias relacionales son más evidentes durante su establecimiento.

Además del enfoque en las correspondencias entre relaciones, según la TME, las analogías tienen dos características más: consistencia estructural y sistematicidad. Para ser considerada estructuralmente consistente, una analogía debe incluir correspondencias uno a uno entre los elementos y atributos de estos elementos en los dos dominios, de manera que dos o más elementos (o atributos) en un dominio no correspondan al mismo elemento único (o atributo) en el otro dominio. Además, la conectividad paralela entre los argumentos de las relaciones correspondientes debe existir, de manera que los argumentos de una relación en el dominio objetivo son paralelos y corresponden a argumentos similares de la relación identificada en el dominio base, y viceversa. Las analogías también deben obedecer al principio de sistematicidad, lo que significa que deben tener un sistema de relaciones interconectadas, de manera que relaciones más simples, llamadas relaciones de primer orden, estén conectadas o interrelacionadas por relaciones más complejas, también conocidas como relaciones de segundo orden o relaciones de orden superior.

El mapeo estructural de una analogía consiste en identificar elementos, atributos y relaciones relevantes en el dominio base para comprender los elementos, atributos y relaciones similares en el dominio objetivo de la comparación. Por lo tanto, este mapeo debe realizarse de manera exhaustiva para mostrar la estructura relacional común entre los dos dominios. Además de la similitud, el mapeo estructural también puede indicar la existencia de diferencias alineables y no alineables entre los dominios y las limitaciones de la analogía. Según Gentner y Markman (1997), las diferencias alineables son aquellas que están conectadas a aspectos similares en los dominios, y son más evidentes que las diferencias no alineables, ya que las personas tienden a identificar una mayor cantidad de diferencias para pares de elementos con mayor similitud.

En cuanto a las limitaciones que puede presentar una analogía, Mozzer y Justi (2015) plantean que son inherentes a cualquier comparación. Sin embargo, es importante que se discutan con los estudiantes. Los autores destacan que estas limitaciones se relacionan con detalles específicos que no son compartidos entre el Dominio Base (DB) y el Dominio Objetivo (DO), o incluso situaciones en las que la analogía no se aplica. Barbosa y Ferry

(2018) sintetizan y diferencian tres tipos de limitaciones: (1) Contextos o situaciones en los que la analogía no se aplica; (2) Elementos, características o relaciones presentes en el DO que no tienen correspondencias en el DB, lo que significa que la base es insuficiente para explicar el objetivo; (3) Elementos, características o relaciones presentes en el DB que no pueden ser asociados o transportados al DO.

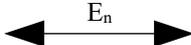
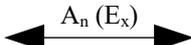
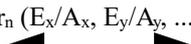
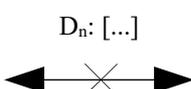
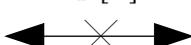
Además del TME, este trabajo se basó en la Teoría de Restricciones Múltiples (*Multiconstraint Theory*) propuesta por Holyoak y Thagard (1989). Estos autores también reconocen la importancia de establecer correspondencias entre los dos dominios en una analogía y afirman que una analogía debe cumplir tres condiciones adicionales: isomorfismo, similitud semántica y centralidad pragmática (adecuación pragmática). Según los autores, el isomorfismo es similar a la correspondencia biunívoca discutida por Gentner y Markman (1997), pero se centra en la forma en que se describen los dominios comparados para establecer la analogía. Además de este aspecto comunicativo de la descripción, la aceptación por parte de los estudiantes de la plausibilidad de una analogía depende de la similitud semántica entre los elementos, atributos y relaciones que se corresponden, es decir, las entidades correspondientes deben tener significados contextuales similares para que las correspondencias tengan sentido. Finalmente, una analogía debe cumplir con las intenciones y propósitos para los que fue creada, es decir, debe ser pragmáticamente adecuada. Para ello, es esencial elegir un dominio base que sea relevante y familiar para los estudiantes, así como determinar qué características de ese dominio son importantes en el contexto en el que se utilizará (Holyoak y Thagard, 1989). Al final, como destacan Marrero Galván y González Pérez (2023) en su revisión sistemática de investigaciones sobre el uso de analogías en la enseñanza de las Ciencias, las percepciones de los estudiantes sobre la validez de las analogías utilizadas en el aula son fundamentales para el proceso de enseñanza y aprendizaje.

Metodología

La metodología utilizada en esta investigación consistió en el análisis de seis libros de texto de Química aprobados por el Programa Nacional de Libros de Texto (PNLD) en Brasil en 2018. Estos libros fueron seleccionados en función de su amplia disponibilidad y carácter público, siendo recomendados para su uso en instituciones educativas en el país. Los libros se etiquetaron con las letras de la A a la F con fines de identificación.

Inicialmente, se realizó un análisis estructural de la analogía de interés, que hace referencia a la receta de la torta, mediante la identificación y alineación de elementos, atributos y relaciones similares, así como la identificación de limitaciones y diferencias alineables. Nuestro objetivo fue mapear exhaustivamente las posibles correspondencias entre los dominios propuestos, independientemente de la forma y el contenido presentes en cada libro. El mapeo estructural de la comparación se realizó siguiendo un patrón de representación de correspondencias que se muestra en la Tabla 1. Para llevar a cabo este mapeo, se utilizó el sistema MAPES (Sistema de Mapeo Estructural de Analogías), desarrollado por Barbosa (2019), que proporciona un conjunto de herramientas con este propósito.

Tabla 1. Representación estándar de correspondencias en el mapeo estructural de analogías y otros tipos de comparación.

Dominio base (DB)	Representación de Correspondencia	Dominio objetivo (DO)
Elementos de dominio base	E_n 	Elementos de dominio objetivo
Atributos del elemento de DB	$A_n (E_x)$ 	Atributos del elemento de DO
Relaciones de primer orden en DB	$r_n (E_x/A_x, E_y/A_y, \dots)$ 	Relaciones de primer orden en DO
Relaciones de segundo orden en DB	${}^2R_n (r_x, r_y/A_y/E_y, \dots)$ 	Relaciones de segundo orden en DO
Relaciones de orden superior de nivel jerárquico 'nh' en DB	${}^{nh}R_n ({}^{nh-1}R_x, R_y/r_y/E_y/A_y, \dots)$ 	Relaciones de orden superior de nivel jerárquico 'nh' en DO
Características o relaciones presentes en la DB, conectadas a puntos en correspondencia, que son diferentes en los respectivos puntos de la DO	Diferencias alineables $D_n: [...]$ 	Características o relaciones presentes en la DO, conectadas a puntos en correspondencia, que son diferentes en los respectivos puntos de la DB.
Condiciones de dominio base para las que no se aplica la comparación; o bien, elementos, atributos o relaciones de la DB que no deben transferirse a la DO.	Limitaciones $L_n: [...]$ 	Condiciones de dominio objetivo para las que no se aplica la comparación; o elementos, atributos o relaciones en el DO que no coinciden en el DB.

Fuente: Ferry (2018, p. 111 y 112) adaptado.

Posteriormente, se verificó la presencia de la comparación en los capítulos y secciones dedicadas a la estequiometría química mediante una lectura completa y dirigida, buscando expresiones e ilustraciones que evidenciaran el uso de esta analogía. Además, se caracterizó el contexto de presentación asociado al subtema de proporcionalidad entre reactivos y productos en una reacción química, con el fin de analizar cuatro aspectos: consistencia estructural, enfoque de la comparación, sistematización y similitud semántica de las entidades correlacionadas. A continuación, se revisaron los libros en los que se encontró la comparación para comprender cómo se abordó en relación con su potencial analógico y las posibilidades identificadas durante el mapeo estructural. También se analizó el isomorfismo de las afirmaciones relacionadas con los dominios comparados y la adecuación pragmática del uso de la comparación.

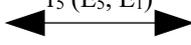
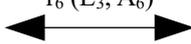
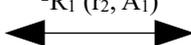
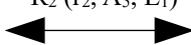
Análisis estructural de la comparación

La Tabla 2 presenta los resultados del mapeo estructural que compara las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas con la preparación y horneado de tortas basados en una receta culinaria.

Tabla 2. Mapeo estructural de la comparación entre la estequiometría de reacciones químicas y una receta culinaria para preparar y hornear tortas.

DOMINIO BASE	CORRESPONDENCIA	DOMINIO OBJETIVO
Torta / Pastel	$\longleftrightarrow E_1$	Productos
Ingredientes	$\longleftrightarrow E_2$	Reactivos químicos
Preparación de tortas (hornear)	$\longleftrightarrow E_3$	Formación de productos (reacción química)
Receta culinaria	$\longleftrightarrow E_4$	Estequiometría química
Impurezas presentes en los ingredientes	$\longleftrightarrow E_5$	Impurezas presentes en los reactivos químicos
Mezcla de ingredientes	$\longleftrightarrow E_6$	Mezcla de reactivos
Cantidad de torta producida	$\longleftrightarrow A_1 (E_1)$	Cantidad de productos formados
Cantidad de ingredientes	$\longleftrightarrow A_2 (E_2)$	Cantidad de reactivos
Grado de pureza de los ingredientes	$\longleftrightarrow A_3 (E_2)$	Grado de pureza de los reactivos
Rendimiento de hornear la torta	$\longleftrightarrow A_4 (E_3)$	Rendimiento de la formación del producto (a partir de la reacción química)
Exceso de ingredientes	$\longleftrightarrow A_5 (E_2)$	Exceso de reactivos
Aspecto de la mezcla de ingredientes	$\longleftrightarrow A_6 (E_6)$	Aspecto de la mezcla de reactivos
Los ingredientes (E_2) se convierten en un pastel (E_1) siguiendo una receta culinaria específica (E_4).	$\longleftrightarrow r_1 (E_2, E_1, E_4)$	Los reactivos (E_2) se transforman en productos (E_1) siguiendo una estequiometría específica (E_4).
Las cantidades de ingredientes (A_2) utilizadas para hacer la tarta (E_3) están determinadas por la receta culinaria específica (E_4).	$\longleftrightarrow r_2 (A_2, E_3, E_4)$	Las cantidades de reactivos (A_2) a utilizar para la formación de productos (E_3) se determinan por estequiometría química (E_4).
El grado de pureza de los ingredientes (A_3) puede afectar el rendimiento de horneado del pastel (A_4).	$\longleftrightarrow r_3 (A_3, A_4)$	El grado de pureza de los reactivos (A_3) afecta el rendimiento de formación del producto (A_4).
No todos los ingredientes impuros afectan el rendimiento de horneado de pasteles.	$D_1: [r_3 (A_3/E_5, A_4)]$ $\longleftrightarrow \times$	Cada reactivo impuro afecta el rendimiento de la formación del producto.
Independientemente de las cantidades de ingredientes (A_2) mezclados en la preparación, tiene lugar el horneado del pastel (E_3).	$\longleftrightarrow r_4 (A_2, E_3)$	Independientemente de las cantidades de reactivos (A_2) mezclados para la reacción, se produce la formación de productos (E_3).

Tabla 2. Continuación

DOMINIO BASE	CORRESPONDENCIA	DOMINIO OBJETIVO
Las impurezas presentes en los ingredientes (E_5) permanecerán mezcladas con la torta horneada (E_1).	$r_5 (E_5, E_1)$ 	Las impurezas presentes en los reactivos (E_5) quedarán mezcladas con los productos formados (E_1).
Macroscópicamente, durante la preparación de la torta (cocción) (E_3), la apariencia de la mezcla preparada cambia (A_6).	$r_6 (E_3, A_6)$ 	Macroscópicamente, durante la formación de productos (reacción química) (E_3), la apariencia de la mezcla de reacción puede cambiar (A_6).
Macroscópicamente, hornear un pastel siempre cambia la apariencia de la mezcla de ingredientes.	$D_2: [r_6 (E_3, A_6)]$ 	Macroscópicamente, no todas las reacciones químicas cambian la apariencia de la mezcla de reacción.
Variando las cantidades de ingredientes determinadas por la receta culinaria, se hornea una cantidad proporcional de pastel.	${}^2R_1 (r_2, A_1)$ 	Al variar las cantidades de reactivos determinadas por estequiometría, en una reacción química se forma una cantidad proporcional de productos.
[Si las cantidades de ingredientes (A_2) no están de acuerdo con la receta de cocción (E_4), después de hornear el pastel (E_3)] – r_2 , habrá un exceso de al menos un ingrediente (A_5), que quedará mezclado con la torta horneada (E_1).	${}^2R_2 (r_2, A_5, E_1)$ 	[Si las cantidades de reactivos (A_2) no están de acuerdo con la estequiometría (E_4), después de la reacción química (E_3)] – r_2 , habrá un exceso de al menos un reactivo (A_5), que quedará mezclado con el productos formados (E_1).
Preparar u hornear pasteles no es un proceso reversible.	$L_1: [A_7 (E_3)]$ 	Las reacciones químicas son reversibles.
Hornear pasteles es siempre un proceso endotérmico.	$L_2: [A_8 (E_3)]$ 	Las reacciones químicas son procesos endotérmicos o exotérmicos (no todas las reacciones químicas son procesos endotérmicos).

Según el exhaustivo mapeo estructural presentado en la tabla 2, la comparación entre la estequiometría de las reacciones químicas (DO) y una receta culinaria para la elaboración de un pastel (DB) permite establecer seis correspondencias entre elementos, seis correspondencias entre atributos relevantes de dichos elementos, seis correspondencias entre relaciones de primer orden y dos correspondencias entre relaciones de segundo orden, además de dos diferencias alineables y dos restricciones. Esta cantidad de correspondencias demuestra la riqueza de esta comparación.

Además, el mapeo estructural permite afirmar que esta comparación es estructuralmente consistente, ya que, entre los dos dominios (DO y DB), es posible verificar: (i) una correspondencia uno a uno entre los elementos y sus atributos, sin que haya dos o más elementos o atributos en un dominio que correspondan al mismo y único elemento o atributo en el otro; y (ii) una conectividad paralela entre los argumentos de las 8 relaciones

similares que están alineadas: 6 de primer orden y 2 de segundo orden. Esta conectividad se puede verificar, indicando los códigos de argumento de las relaciones enumeradas en ambos dominios en la tabla 2.

La tabla 2 apunta hacia el mayor número de relaciones de correspondencia en relación con el número de atributos mapeados, destacando el enfoque relacional de la comparación. Esto nos permite afirmar con seguridad que la comparación entre la estequiometría de las reacciones químicas y la receta de un pastel es, de hecho, una analogía. Considerando los contextos en los que se presenta esta comparación y nuestra experiencia docente, cabe señalar que la principal relación evocada en esta analogía es la 2R_1 , la cual podría enunciarse de la siguiente manera: «Al igual que variar las cantidades de ingredientes en una receta culinaria hace que se cocine una cantidad proporcional de pastel, variando las cantidades de reactivos determinadas por la estequiometría química se forma una cantidad proporcional de productos». Esta relación es designada como una relación de segundo orden, ya que evoca otra relación de menor complejidad previamente identificada en el mapeo: la relación r_2 . Se debe tener en cuenta que esta misma relación (r_2) también constituye un argumento para otra relación de segundo orden mapeada (2R_2), que aborda el tema de exceso de reactivos mezclados en cantidades no estequiométricas. Además, podemos decir que la relación r_2 es una variación sutil de una relación aún más fundamental: la relación r_1 , que trata sobre la velocidad a la que los reactivos se convierten en productos.

La presencia de dos relaciones de segundo orden, aunque indirectamente conectadas a través de la relación r_2 , muestra cierta sistematicidad que favorece la comprensión del dominio objetivo. Esto se debe a la posibilidad de realizar inferencias a partir del conocimiento sobre el dominio base. Por otro lado, las demás relaciones de primer orden (r_3 , r_4 , r_5 y r_6) se configuran como predicados relacionales aislados, es decir, no están conectados entre sí. Estas relaciones, en correspondencia con el dominio base, abordan diferentes aspectos de las reacciones químicas: r_3 , la forma en que el grado de pureza de los reactivos afecta el rendimiento; r_4 , la ocurrencia de la reacción química independientemente de las cantidades de reactivos mezclados; r_5 , la presencia de impurezas incluso después de que haya ocurrido la reacción; y r_6 , el cambio en la apariencia de la mezcla de reacción.

Analizando cada una de las correspondencias mapeadas, podemos verificar la existencia de similitud semántica tanto entre los elementos como entre los atributos y, principalmente, las relaciones alineadas. La similitud semántica se deriva del hecho de que ambos dominios involucran la manipulación de sustancias materiales y fenómenos de la misma naturaleza. Las correspondencias E_1 y E_2 , por ejemplo, involucran entidades materiales concretas, semánticamente similares. La correspondencia E_3 trata de dos procesos y la correspondencia E_4 , de lineamientos sobre estos procesos. La receta culinaria y la estequiometría química presentan similitud semántica, ya que ambas describen las proporciones en que las entidades materiales deben ser mezcladas para que los procesos ocurran sin excesos y desperdicios.

También observamos similitud semántica entre las relaciones en correspondencia: prácticamente todas las relaciones identificadas en los dos dominios son de naturaleza causal, es decir, expresan una relación de causa y efecto. Además, las conexiones paralelas de los argumentos semánticamente similares contribuyen a la percepción de la similitud semántica de cada relación en correspondencia, lo que facilita la interpretación de la analogía y la comprensión de las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas.

Diferencias alineables y limitaciones de la analogía de la receta culinaria

En el análisis estructural de la analogía, identificamos dos diferencias alineables que consideramos importantes para tratar en el aula. Estas diferencias, alineadas con las correspondencias, son: la D_1 , relacionada con la similitud entre la pureza de los reactivos y los ingredientes y su impacto en el rendimiento de la reacción química y en la cocción de la torta, respectivamente; y la D_2 , relacionada con la alteración macroscópica tanto de la mezcla de reacción como de la mezcla de ingredientes durante la ocurrencia de los fenómenos descritos en cada dominio.

En cuanto a la primera diferencia (D_1), es importante tener en cuenta que, aunque la disminución en la pureza de los reactivos necesariamente afecta el rendimiento de una reacción química, produciendo menos de lo esperado, en el caso de la elaboración de pasteles, una variación en la *pureza* de algunos ingredientes no necesariamente provocará una disminución en el rendimiento de la torta, es decir, producir menos torta de la esperada. Por ejemplo, si se elabora un pastel con 100 g de azúcar en polvo que consiste en un 30% de maicena, la reducción en la cantidad real de azúcar utilizada no afectará necesariamente la cantidad de pastel preparado. Sin embargo, el rendimiento probablemente se vería afectado si la pureza del polvo de hornear, por ejemplo, fuera solo del 70%.

Sobre la diferencia D_2 , creemos que proporciona una oportunidad para que los estudiantes comprendan que muchos fenómenos químicos no involucran cambios visibles o aparentes en el sistema de reacción. Esta diferencia está en línea con la relación r_6 , que relaciona el elemento E_3 con el atributo A_6 .

Además de estas diferencias, el mapeo estructural también identifica dos limitaciones de la analogía: la primera (L_1) se presenta como una condición específica del dominio objetivo, la reversibilidad de las reacciones químicas, que no se aplica al dominio base. Para abordar esta limitación, se asignó el código A_7 a un nuevo predicado descriptivo del dominio objetivo que no había sido mapeado anteriormente.

La segunda limitación (L_2) es un aspecto descriptivo del dominio base, la naturaleza endotérmica de los procesos de cocción, que no puede ser aplicado al dominio objetivo, ya que no todas las reacciones químicas son endotérmicas. Para esta limitación, se identificó un nuevo código (A_8) para el predicado descriptivo del proceso de horneado de tortas.

Es necesario destacar que, aunque el mapeo presentado es exhaustivo, no abarca todas las posibilidades de correspondencias de semejanza, ni todas las diferencias alineables y limitaciones de la analogía. No obstante, consideramos que las diferencias alineables identificadas y las dos limitaciones son aspectos relevantes e importantes a considerar en la construcción de esta analogía en el aula para el aprendizaje de la estequiometría.

Análisis de la presentación de la analogía en los libros de texto

En los seis libros de texto de química que fueron analizados, se encontraron 18 comparaciones diferentes en un total de 24 ocurrencias de establecimiento. Esto significa que algunas comparaciones se repetían en distintos libros. De las 18 comparaciones encontradas, una de ellas, la comparación de la receta de cocina con las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas, fue encontrada en 3 libros de texto (B, D y F, que representan el 50% de los libros analizados). Esta comparación también fue la única

que se repetía entre los libros. Las Figuras 1, 2 y 3 muestran extractos de los libros en los que se estableció esta comparación.



Cálculos teóricos

Você já tentou fazer um bolo? Se tentou, sabe que é preciso que indica a proporção dos ingredientes e o modo de fazer

Receita de bolo simples

Ingredientes

- 2 copos e meio de farinha
- 2 copos e meio de açúcar
- 1 colher de sopa de manteiga

Como fazer

Bata as claras em neve e, em outro recipiente, bata o açúcar com as gemas e a manteiga. Adicione a farinha de trigo e o leite morno. Por último coloque o fermento e incorpore, aos poucos, as claras em neve à massa. Asse em forno preaquecido em uma assadeira redonda e previamente untada com manteiga e farinha de trigo.

- 1 copo de leite morno
- 4 ovos
- 1 colher de chá de fermento em pó



Se você modificar a proporção de qualquer um dos ingredientes de um bolo diferente do esperado (mais seco, mais mole, mais duro, sem estrutura, etc.).

Considerando as diferenças entre a culinária e a Química, um problema semelhante quando provocamos a reação de síntese para obter um produto: **as substâncias reagem e formam produtos com proporção específica.**

Figura 1. Comparación presentada en el libro B.



Nas palavras de Proust:

[...] um composto é um produto privilegiado ao qual a natureza confere proporções fixas [...].

Devemos reconhecer, portanto, [...] que as características de um composto verdadeiro são invariáveis como a proporção entre seus elementos [...].

PROUST, Joseph Louis, J. de Phys., LXII, 1806, 364 f. apud PARTINGTON, James Riddick, *A History of Chemistry*, London MacMillan, 1954, v. 3, p. 650.



Sabe-se, hoje, que nem todas as substâncias compostas seguem a Lei de Proust, pois existem algumas para as quais as proporções entre os átomos podem variar. Para a maioria das substâncias com as quais lidamos em nosso cotidiano e para todas aquelas com as quais trabalharemos ao longo do nosso curso, no entanto, a Lei de Proust continua essencialmente válida e aplicável.

Figura 8.7
Podemos encontrar a Lei de Proust em quase tudo que fazemos. Quando preparamos um bolo ou cupcakes coloridos, por exemplo, utilizamos essa lei para usar a quantidade exata de ingredientes para atingirmos o resultado desejado.

Figura 2. Comparación presentada en el libro D.



▲ Assim como os ingredientes de um bolo devem ser medidos em proporções ideais, os reagentes devem seguir relações estequiométricas corretas.

Ao se preparar um bolo, os ingredientes devem ser adicionados proporcionalmente, ou seja, não se pode retirar um ingrediente ou aumentar apenas um deles sem acrescentar os demais na mesma proporção. Isto é, se você aumenta ou diminui a quantidade de um, terá de fazê-lo também com os outros, na mesma proporção.

Da mesma forma, os cálculos químicos baseiam-se em relações de proporcionalidade.

Figura 3. Comparación presentada en el libro F.

El análisis de los contextos de las comparaciones en cada libro de texto, que se presenta en las Figuras 1, 2 y 3, nos permite afirmar que en las tres ocurrencias, la comparación entre la estequiometría de las reacciones químicas y las recetas culinarias se estableció con propósitos contextuales similares: ofrecer un contexto de aplicación tangible y fácil de comprender para los estudiantes, con el fin de facilitar la comprensión de las relaciones de proporcionalidad fijas entre reactivos y productos en las reacciones químicas. Las diferencias observadas entre los propósitos contextuales identificados se describen con más detalle más adelante en este artículo.

Otro aspecto que se puede apreciar en estas tres figuras es el uso de ilustraciones para fortalecer la descripción del dominio base de la comparación, además de la enunciación de correspondencias entre los dos dominios. Se puede decir que el uso de ilustraciones probablemente ayuda a los estudiantes a comprender las correspondencias analógicas previstas. En cuanto a la presencia de enunciados que describen las correspondencias establecidas, este hallazgo sugiere que la comparación no se aborda simplemente mediante la presentación de los dominios, lo que podría dejar la interpretación de la misma en manos de los estudiantes o profesores.

En relación a la manera en que se utilizó la analogía en cada libro de texto, se identificó qué correspondencias mapeadas fueron abordadas por los autores. En el libro D, a través de la leyenda que acompaña una fotografía de pasteles de colores (véase la figura 2), los autores solo abordaron la relación r_2 del dominio base: «utilizamos esta ley [de Proust] para emplear la cantidad exacta de ingredientes y lograr el resultado deseado». Sin embargo, en el libro B, se exploró un poco más la analogía.

En el libro B, los autores abordaron tanto la relación r_2 en el dominio base – «la receta indica la proporción de ingredientes», como la relación r_1 en el dominio objetivo – «las sustancias reaccionan y forman productos en una proporción específica». Además, exploraron la combinación de las relaciones 2R_1 y r_4 en el dominio base: «si cambias la proporción de alguno de los ingredientes, obtendrás un pastel diferente al esperado». Sin embargo, consideramos que habría sido más apropiado abordar cada una de estas relaciones de manera separada. En primer lugar, se debería discutir la posibilidad de variar las cantidades de ingredientes en el dominio base y de reactivos en el dominio objetivo, lo que lleva a la generación de cantidades proporcionales de pastel y productos, respectivamente. Luego, por separado, se podría señalar que, independientemente de las cantidades mezcladas en una reacción química, los fenómenos (reacción y cocción) ocurren. La exploración de la relación 2R_2 de segundo orden en ambos dominios complementaría adecuadamente la idea de que el exceso de algún reactivo o ingrediente se

mezcla con los productos formados. Además, al sustituir los elementos del dominio base por los elementos del dominio objetivo en la oración anterior, se obtiene una proposición errónea desde el punto de vista químico: «Si cambias la proporción de cualquiera de los reactivos, obtendrás un producto diferente al esperado...». La proposición correcta podría ser: «Si cambias la proporción de cualquiera de los reactivos, los productos se formarán proporcionalmente, determinados por la cantidad del reactivo limitante y mezclados con el exceso de los demás reactivos».

En el libro B, se hace una breve mención a la distinción entre la receta culinaria y la estequiometría de reacciones: «teniendo en cuenta las diferencias entre la cocina y la química...». Sin embargo, los autores no profundizan en qué consisten dichas diferencias, dejando la tarea de identificarlas al lector o al profesor.

En el libro F, los autores se enfocan principalmente en las relaciones de primer orden r_1 y r_2 . Los siguientes extractos del libro F muestran las afirmaciones relacionadas con el DB y las afirmaciones relacionadas con el DO, con las correspondientes relaciones señaladas en la Tabla 2:

«En el momento de preparar un pastel, es importante agregar los ingredientes en proporciones adecuadas (r_2 en el DB), lo que significa que no se puede eliminar un ingrediente o aumentar solo uno sin ajustar la cantidad de los demás en la misma proporción (r_2 y r_1 en el DB). Esto significa que si se aumenta o disminuye la cantidad de un ingrediente, se debe hacer lo mismo con los demás en la misma proporción» (reafirmaciones de r_2 y r_1 en el DB).

«Al igual que los ingredientes de un pastel deben medirse en proporciones adecuadas (reafirmación de r_2 en el DB), los reactivos deben seguir proporciones estequiométricas correctas» (r_2 en el DO).

Es importante destacar que los autores de los libros D y F no mencionan ninguna diferencia o limitación. Como se mencionó previamente, la identificación de las diferencias solo se encuentra en el libro B. Creemos que el enfoque en las diferencias alineables y las limitaciones de las analogías debería ser planificado por los profesores y destacado por los autores de los libros de texto, con el objetivo de evitar interpretaciones erróneas sobre entidades científicas tomadas como objetos de comprensión. Aunque algunas diferencias o limitaciones puedan parecer obvias para nosotros, nuestra experiencia en la enseñanza de las Ciencias, especialmente de la Química, nos permite afirmar que la aparente obviedad de algunas analogías puede ser un obstáculo para la comprensión compartida en su construcción en el aula.

En cuanto a la utilización de isomorfismo en la presentación de la analogía en los libros de texto, solo el último pasaje del libro F nos permite llevar a cabo un análisis. Al examinar el isomorfismo entre los enunciados relacionados con los dos dominios de la analogía en este pasaje – «así como los ingredientes de un pastel deben medirse en proporciones ideales, los reactivos deben seguir relaciones estequiométricas correctas», identificamos tres pares de términos o expresiones similares asociados con tres correspondencias mapeadas: (i) E_2 – «ingredientes de un pastel» / «reactivos»; (ii) parte de r_2 – «debe medirse» / «debe seguir»; (iii) E_4 – «en proporciones ideales» / «relaciones estequiométricas correctas». Aunque cada par de términos o expresiones no se presentan de la misma forma, y no son exactamente isomorfos, podemos decir que cumplen en cierta medida la restricción del isomorfismo.

Aunque en la presentación de la analogía en el libro B hay enunciados que se refieren a los dos dominios (un número mayor para el DB y solo uno para el DO), los pasajes marcados

se refieren a diferentes relaciones, a veces a r_2 , a veces a r_1 . En los demás extractos, los enunciados se refieren únicamente al dominio base, es decir, sin referencia directa al dominio objetivo. Consideramos que la ausencia de referencias directas al dominio objetivo, o la ausencia de isomorfismo entre los enunciados correspondientes, pueden dificultar o comprometer la comprensión de la analogía, haciéndola aparentemente menos plausible.

Finalmente, al considerar los objetivos contextuales derivados de nuestra interpretación de cómo se presentó la analogía en cada libro de texto, podemos concluir acerca de su adecuación pragmática en cada caso. Es importante destacar que en esta investigación no se tuvieron en cuenta otros criterios contextuales relacionados con la presentación de la analogía en los libros de texto, tales como la orientación analógica, la posición del dominio base frente a la explicación del dominio objetivo o el nivel de abstracción del dominio base y dominio objetivo. En cuanto al objetivo contextual de utilizar la analogía entre la estequiometría de las reacciones químicas y una receta culinaria para la preparación de pasteles en al menos dos libros de texto (B y F), se buscaba principalmente proporcionar un contexto de aplicación similar y más tangible para los estudiantes, con el fin de ayudarles a comprender las relaciones de proporcionalidad fija entre los reactivos y los productos en la ocurrencia de reacciones químicas. Aunque la cantidad de relaciones de correspondencia abordadas es menor que las posibilidades identificadas en el análisis estructural, podemos afirmar que la analogía es pragmáticamente adecuada, es decir, cumple con este objetivo.

En el libro D, en el que se presentó la analogía en el contexto de la explicación de la Ley de Proust, consideramos que no es adecuada desde una perspectiva pragmática. Un análisis cuidadoso del contexto revela que los autores, con el objetivo de ofrecer un contexto para comprender la ley de las proporciones constantes en la composición de las sustancias, presentaron una imagen de pasteles de colores (*cupcakes*) y se refirieron a la necesidad de utilizar esta ley para mezclar las cantidades exactas de ingredientes para preparar el producto deseado. Sin embargo, la baja similitud semántica entre *composición* y *preparación* parece comprometer la idoneidad pragmática de elegir esta analogía para referirse a las proporciones fijas entre elementos en sustancias, ya que la idea de composición se asemeja más a un predicado descriptivo de sustancias, mientras que la idea de *preparar pasteles* se caracteriza como un procedimiento que conduce a la obtención del producto. Además, habría sido más apropiado afirmar en la descripción de la imagen de los pasteles que «la composición del producto deseado implica ciertos ingredientes en una proporción fija», en lugar de afirmar que se utiliza la Ley de Proust «para utilizar la cantidad exacta de ingredientes», ya que las cantidades pueden variar proporcionalmente de acuerdo con las pautas de la receta de cocción.

Consideraciones finales

El análisis estructural realizado a partir del mapeo de las correspondencias entre el dominio objetivo (estequiometría de las reacciones químicas) y el dominio base (receta culinaria para la preparación de pasteles) nos ha permitido concluir que esta comparación constituye una analogía estructuralmente consistente, con un enfoque relacional adecuado, sistemático y con correspondencias entre entidades semánticamente similares. Esta analogía se considera un recurso didáctico apropiado desde una perspectiva pragmática, dado que ofrece un contexto de aplicación similar y más tangible para comprender las relaciones

fijas de proporcionalidad entre reactivos y productos en la ocurrencia de reacciones químicas.

El análisis de esta analogía revela un gran potencial didáctico, ya que su análisis estructural permitió identificar 20 correspondencias semánticas. Su enfoque relacional y sistemático brinda la posibilidad de generar un mayor número de inferencias en el aula sobre las relaciones estequiométricas de las reacciones químicas.

En resumen, la analogía entre la receta culinaria y la estequiometría ofrece numerosas posibilidades didácticas, como utilizarla como un recurso mediador en el aula para enseñar los conceptos de proporciones entre reactivos y productos en una reacción química, introducir y explicar el equilibrio de las ecuaciones químicas, abordar los conceptos de reactivos en exceso y limitantes en una reacción química, trabajar el concepto de pureza y explorar el concepto de rendimiento en procesos químicos.

En cuanto al uso de esta analogía en los libros de texto investigados, observamos que se ha abordado principalmente para ilustrar dos de las relaciones mapeadas: r_1 - «los reactivos se transforman en productos siguiendo una estequiometría específica», en correspondencia con «los ingredientes se transforman en un pastel siguiendo una receta específica»; y r_2 - «las cantidades de reactivos a utilizar para la formación de productos son determinadas por la estequiometría química», en correspondencia con «las cantidades de ingredientes a utilizar para la cocción de la torta son determinadas por la receta culinaria». Sin embargo, creemos que esta comparación tiene un potencial analógico más profundo que no ha sido explorado por los autores de los libros de texto investigados. Por ejemplo, la relación r_1 podría ampliarse a la relación de segundo orden codificada como 2R_1 , que aborda la variación en la formación de cantidades proporcionales de productos debido a la variación en las cantidades de reactivos determinadas por la estequiometría de la reacción, de manera similar a la posibilidad de producir una torta proporcional en función de la variación en las cantidades de ingredientes determinadas por la receta culinaria.

Además, ninguno de los libros evaluados abordó las diferencias alineables y las limitaciones de esta analogía. La falta de este enfoque puede llevar a los estudiantes a transponer equivocadamente atributos o relaciones del dominio base al dominio objetivo, lo que puede afectar la atribución de significado por parte de los estudiantes mientras intentan comprender los conceptos y aprender los procedimientos para realizar cálculos estequiométricos.

En conclusión, el análisis realizado sugiere que el mapeo estructural de la analogía entre la estequiometría de las reacciones químicas y una receta culinaria para hornear pasteles no solo permitió analizar aspectos estructurales, semánticos y pragmáticos, sino que también nos llevó a diferentes aspectos que pueden ser abordados en la enseñanza de la estequiometría, ya sea por parte de los profesores de Química en el aula o por parte de los autores de materiales didácticos en sus libros. Este mapeo puede ser una herramienta útil para la planificación y construcción de secuencias didácticas para la enseñanza de la estequiometría.

Referencias

- Barbosa, W. V. (2019). *Análise da sistematicidade de analogias em contextos de ensino e de pesquisa na educação em ciências*. [Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais]. Página eletrônica de Dissertações/Teses do Programa de Pós-graduação em Educação Tecnológica do CEFET-MG.

- Barbosa, W. V. y Ferry, A. S. (2018). Concepção de um software para mapeamento estrutural de analogias empregadas no ensino de ciências. *Educitec*, 4(8), 224-243.
- Bernardino, M. A., Rodrigues, M. A. y Bellini, L. M. (2013). Análise Crítica das Analogias do Livro Didático Público de Química do Estado do Paraná. *Ciência & Educação*, 10(1), 135-150.
- Costa, A. A. y Souza, J. R. (2013). Obstáculos no processo de ensino e de aprendizagem de cálculo estequiométrico. *Amazônia: Revista de Educação em Ciências e Matemáticas*, 10(19), 106-116.
- Ferry (Org.), A. S. (2018). *Pesquisas sobre Analogias no contexto da Educação em Ciências à luz da Teoria do Mapeamento Estrutural (Structure-mapping theory)*. São Paulo: Livraria da Física.
- Francisco Junior, W. E. (2009). Analogias em livros didáticos de química: um estudo das obras aprovadas pelo Plano Nacional do Livro Didático Para o Ensino Médio 2007. *Ciências & Cognição*, 14(1), 121-143.
- Gentner, D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2), 155-170.
- Gentner, D. y Markman, A. B. (1997). Structure Mapping in Analogy and Similarity. *American Psychologist*, 52(1), 45.
- Gomes, R. S. y Macedo, S. (2007). Cálculo estequiométrico: o terror nas aulas de Química. *Vértices*, 9(1), 149-160.
- Holyoak, K. J. y Thagard, P. (1989). Analogical mapping by constraint satisfaction. *Cognitive Science*, 13(3), 295-355. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1101
- Marrero Galván, J. J. y González Pérez, P. (2023). Investigaciones sobre el uso de analogías en el aula de ciencias: una revisión sistemática. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 20(1), 110100-110121. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1101
- Monteiro, I. G. y Justi, R. S. (2000). Analogias em livros didáticos de química brasileiros destinados ao ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, 5(2), 67-91.
- Mozzer, N. B. y Justi, R. (2015). «Nem tudo que reluz é ouro»: Uma discussão sobre analogias e outras similaridades e recursos utilizados no ensino de Ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 15(1), 123-147.
- Ramírez, J., Chávez, J., López, V., Jiménez, W. y Casas, J. (2009). ¡¡Estequiometria visible!! *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6(3), 477-482. http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2009.v6.i3.12
- Raviolo, A. y Lerzo, G. (2014). Analogías en la enseñanza de la estequiometría: revisión de páginas web. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 9(2), 28-41.
- Raviolo, A. y Lerzo, G. (2016). Enseñanza de la estequiometría: uso de analogías y comprensión conceptual. *Educación Química (México)*, 27(3), 195-204.
- Raviolo, A., Lerzo, G. y Piovano, N. (2014). Enseñar estequiometría con analogías: desarrollo de una secuencia didáctica. *Educación en la Química*, 20(2), 129-142.

- Santos, L. C. y Silva, M. G. (2013). O estado da arte sobre estequiometria: dificuldades de aprendizagem e estratégias de ensino. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, Extra, 3205-3210.
- Silva, L. P., Lima, A. d., y Silva, S. A. (2010). As Analogias no Ensino de Química: Uma Investigação de sua Abordagem nos Livros Didáticos de Química do Ensino Médio. In: *Encontro Nacional de Ensino de Química*, XV. Brasília: Universidade de Brasília.