

05

LAS REPRESENTACIONES DE LOS ESTUDIANTES SOBRE EL CONCEPTO DE CONCENTRACIÓN DE DISOLUCIONES

The Representations of students on the concept of concentration of dissolutions

RESUMEN

Andrés Raviolo

araviolo@unrn.edu.ar

Universidad Nacional de Río Negro (UNRN).
<https://orcid.org/0000-0003-3498-6245>

Andrea S. Farré

asfarré@unrn.edu.ar

Universidad Nacional de Río Negro (UNRN).
<https://orcid.org/0000-0001-6955-8270>

El concepto de concentración de disoluciones es básico en las ciencias experimentales; sin embargo, no ha sido abordado en profundidad por la investigación educativa. Este artículo presenta un relevamiento y discusión sobre las investigaciones que se llevaron adelante acerca de las representaciones internas de los estudiantes, sobre el concepto de concentración, que emplearon situaciones con diagramas de partículas. También realiza un análisis de las representaciones que evocan 36 estudiantes de primer año de universidad, en entrevistas con protocolo de pensar en voz alta, cuando resuelven un cuestionario. El cuestionario indaga el conocimiento sobre las relaciones entre las variables involucradas en la definición de concentración. Los resultados muestran que: (a) los diagramas de partículas pueden ser útiles para la enseñanza y la evaluación de las concepciones de los estudiantes si se atiende a una serie de limitaciones de las mismas y (b) los estudiantes entrevistados recurren a distintas representaciones que hacen referencia a objetos, propiedades o procesos macroscópicos y no a partículas submicroscópicas. Finalmente, se comparten implicaciones para la enseñanza.

Palabras-Clave: Representaciones internas. Concentración de disoluciones; Enseñanza y aprendizaje.

ABSTRACT

The concept of solution concentration is basic in the experimental sciences; however, it has not been addressed in depth by educational research. This article presents a review and discussion about the investigations that have been carried out regarding the students' internal representations of the concept of concentration, which used situations with particle diagrams. It also analyses the representations evoked by 36 first-year university students, in interviews with the thinking-aloud protocol, when they solve a questionnaire. The questionnaire inquires about the relationships between the variables involved in the definition of concentration. The results show that: (a) particle diagrams can be useful for teaching and evaluating students' conceptions if a series of limitations are taken into account and (b) the interviewed students resort to different representations referring to macroscopic objects, properties or processes and not submicroscopic particles. Finally, implications for teaching are shared.

Keywords: Internal representations. Concentration of solutions. Teaching and learning.



INTRODUCCIÓN

El tema disoluciones es un tema básico y fundamental para las ciencias experimentales; sin embargo, su aspecto cuantitativo, asociado al concepto de concentración, no es abordado en profundidad, ni en las aulas, ni en la investigación. La problemática de su enseñanza y aprendizaje ha sido poco investigada por la didáctica de las ciencias (CALYK et al., 2005); por ejemplo, no figura en la revisión realizada por Kind (2004) sobre las ideas previas de los estudiantes en temas básicos de química. En tanto, en la revisión de Barke, Hazari y Yitbarek (2009) solamente se menciona a la concentración cuando se describen ideas alternativas sobre el equilibrio químico. No obstante, los estudiantes cuentan con representaciones internas sobre las disoluciones, que fueron construidas en entornos cotidianos y académicos. Estas representaciones son las que se ponen en juego ante una situación problema, como es el cálculo de la concentración, y esto sucede, especialmente, cuando dicha situación les resulta compleja (RAVILOLO et al., 2020). Así, a partir de estas representaciones los estudiantes pueden expresar afirmaciones incorrectas desde el punto de vista científico.

Conocer estas ideas es importante ya que es necesario explicitar las representaciones mentales intuitivas para que puedan ser redescritas desde el conocimiento científico. Esta explicitación es progresiva y puede implicar una supresión representacional (lo que no supondría un verdadero aprendizaje ya que no existe un cambio en la representación inicial sino que la misma no se pone en juego), una suspensión representacional (cuando se suspenden características o partes de la representación y se reemplazan por análogos, por lo tanto, se da una combinación de representaciones) hasta la redescipción representacional. Esto último es el propósito de la enseñanza, que comprende: (a) la traducción en nuevos códigos o formatos con mayor potencia representacional, (b) la integración jerárquica de las representaciones implícitas del conocimiento cotidiano empleando el conocimiento científico y (c) la toma de conciencia de la función epistémica y la potencia de estos formatos representacionales (POZO, 2002, 2017).

Así, se entiende porque en el aprendizaje son tan relevantes los diferentes modos de representación externa ya que afectan la propia naturaleza de las representaciones mentales (MARTÍ; POZO, 2000). Siguiendo a estos autores, una representación externa cumple con las siguientes características generales: (a) existen como objetos independientemente de su creador, (b) por ser marcas gráficas que exigen un soporte material determinado, poseen cierta permanencia (pueden ser conservadas, transportadas y manipuladas), (c) a diferencia del lenguaje hablado o de los gestos, son representaciones no desplegadas en el tiempo sino en el espacio y (d) constituyen sistemas organizados, su importancia reside en su aspecto estructural, que demanda conocer una serie de reglas internas y convencionales, lo que hace que no sean fácilmente interpretables.

En el caso de la enseñanza de la química, es frecuente que se empleen diagramas, generalmente diagramas de partículas (moléculas, iones y átomos). Los diagramas son ilustraciones simplificadas o esquemáticas, que cumplen funciones explicativas (CLARK; LYONS, 2011) porque son construidos con la intención de mostrar las partes y entidades de un sistema y las relaciones entre ellas. Como otros diagramas utilizados en química suelen combinar elementos macroscópicos, submicroscópicos y simbólicos (RAVILOLO, 2019).

Sin embargo, la enseñanza del concepto concentración se realiza frecuentemente desde un enfoque algorítmico, basado en la aplicación de fórmulas o rutinas numéricas, que promueve una supresión de las representaciones internas y no una verdadera redescipción en el lenguaje matemático. Por eso con este enfoque se puede estar impidiendo la manifestación de dificultades conceptuales, especialmente sobre las relaciones entre las variables involucradas en las distintas definiciones de las unidades de concentración.

Así como en la enseñanza, también en la investigación de las representaciones implícitas en química, se suelen plantear situaciones que incluyen diagramas de partículas, dado que éstos permiten indagar aspectos conceptuales que no se manifiestan con otros

instrumentos como la resolución de problemas numéricos. Los diagramas de partículas proveen con formas de visualización de un sistema o proceso, que promueven la construcción de un modelo mental del mismo (GABEL, 1998). Sin embargo las imágenes internas que poseemos sobre una disolución, y sobre la concentración, pueden no estar limitadas a representaciones con partículas. Además, este tipo de diagramas demanda de los estudiantes poner en juego habilidades de pensamiento de alto orden (DAVIDOWITZ et al., 2010).

En función de lo antedicho, es que en este artículo se pretende contribuir a dar respuestas a los siguientes interrogantes: ¿Qué resultados se obtuvieron en investigaciones que emplean diagramas de partículas sobre el concepto de concentración? ¿Cuáles son las limitaciones de estos estudios? ¿A qué representaciones internas acuden estudiantes universitarios ante situaciones conceptuales sobre concentración? ¿Qué imágenes han interiorizado? ¿Qué sugerencias se pueden formular para la enseñanza conceptual adecuada del tema?

Los objetivos de este trabajo son: (a) realizar un relevamiento y discusión sobre las investigaciones que se llevaron adelante acerca de las representaciones internas de los estudiantes, sobre el concepto de concentración, que emplearon diagramas de partículas; y (b) analizar las representaciones internas que evocan estudiantes de primer año de universidad, en entrevistas con protocolo pensar en voz alta, cuando resuelven un cuestionario sobre la relación entre las variables involucradas en la definición de concentración. Ambas acciones se llevan a cabo con la finalidad de reflexionar y proponer alternativas sobre la enseñanza del concepto de concentración.

INVESTIGACIONES QUE EMPLEAN DIAGRAMAS DE PARTÍCULAS PARA INDAGAR LA COMPRENSIÓN DE LOS ESTUDIANTES SOBRE EL CONCEPTO DE CONCENTRACIÓN

La investigación educativa (por ej. NURRENBERN; PICKERING, 1987) ha comprobado que la resolución algorítmica o numérica de un problema no implica la comprensión de los conceptos implicados y, en particular, la comprensión a una escala submicroscópica (átomos, iones y moléculas). Alumnos que resuelven problemas correctamente empleando algoritmos o ecuaciones, no siempre visualizan ni comprenden los conceptos químicos que están detrás. En esta línea, el estudio de Smith y Metz (1996) halló que alumnos universitarios sostienen muchas concepciones erróneas sobre el tema disoluciones que fueron detectadas a través de representaciones con partículas, muchas de las cuales no aparecieron en la resolución de problemas tradicionales.

Pocos trabajos han evaluado la comprensión del concepto concentración de disoluciones a través de representaciones submicroscópicas, concibiéndola como número de partículas por unidad de volumen. En los mismos se justifica el uso de este tipo de representaciones en el hecho de que brindan explicaciones de las observaciones experimentales y permiten evaluar en profundidad el conocimiento químico e identificar concepciones erróneas (por ej., DEVENTAK et al., 2009). Para Wink y Ryan (2019), los dibujos a nivel partículas ayudan a poner en evidencia las distintas concepciones sobre molaridad y recomiendan su uso en la enseñanza, como una forma de ilustrar el vínculo de la química y la matemática.

Devetak et al. (2009) indagaron la comprensión de las disoluciones a nivel submicroscópico por parte de estudiantes de secundaria cuya edad promedio era de 16,3 años. En el test que aplicaron se incluían dos problemas sobre el tema de concentraciones. En el primer problema (Figura 1) obtuvieron un 46% de respuestas correctas. Este problema trataba de una situación a volumen constante y los estudiantes debían pensar solo en el número de partículas de soluto para lograr una determinada concentración. En las siguientes figuras se presentan los ítems que se emplearon en las distintas

investigaciones, traducidos al español tratando de ser lo más fiel posible a la versión original.

Figura 1: Primer problema sobre concentración

<p>En tres vasos hay el mismo volumen de agua. La sustancia X se disuelve en el agua. El volumen de la solución formada no se modifica. Dibuje las disoluciones a nivel de partículas en cada uno, si la partícula de soluto se representa como ●. Las moléculas de agua pueden ser omitidas para mejorar la claridad de las imágenes.</p>		
<p>(a) En la parte de la disolución representada en el esquema hay 6 moléculas de soluto.</p>	<p>(b) La disolución representada en el esquema es dos veces más concentrada que la disolución del esquema (a).</p>	<p>(c) La disolución representada en el esquema tiene un tercio de la concentración de la disolución del esquema (b).</p>
		

Fuente: Devetak et al. (2009).

En cambio, el segundo problema (Figura 2) fue contestado correctamente por solo el 18% de los participantes. En este caso los estudiantes tenían que representar las moléculas de soluto en tres situaciones donde cambiaba el volumen, lo que implicaba que tenían que razonar con dos variables, número de partículas y volumen para, por ejemplo, obtener dos disoluciones de la misma concentración. Esto demanda una comprensión más profunda del concepto de concentración.

Figura 2: Segundo problema sobre concentración

<p>Los vasos contienen disoluciones acuosas de una sustancia Y. El volumen de disolución en el vaso A es el doble que en el vaso B. Dibuje en cada caso las disoluciones a nivel de partículas, de modo que las partículas de soluto sean representadas por ●. Las moléculas de agua pueden ser omitidas para mejorar la claridad de las imágenes.</p>		
<p>(a) La concentración en el vaso A es la misma que en el vaso B.</p>	<p>(b) La concentración en el vaso A es la mitad que en el vaso B.</p>	<p>(c) La concentración en el vaso A es un tercio que en el vaso B.</p>
 <p>Vaso A Vaso B</p>	 <p>Vaso A Vaso B</p>	 <p>Vaso A Vaso B</p>

Fuente: Devetak et al. (2009).

En el estudio de de Berg (2012) se enfrentó a estudiantes de primer año de universidad con dos problemas sobre concentración de disoluciones de azúcar en agua. Los dos problemas fueron análogos, uno basado en imágenes submicroscópicas (visual) (Figura 3) y otro basado en palabras (verbal). Las imágenes mostraban recipientes conteniendo agua y puntos que representaban moléculas.

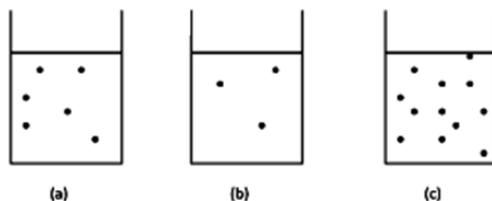
Figura 3: Problema con representaciones submicroscópicas

El vaso de vidrio A tiene el doble de volumen de disolución que el vaso B. En el vaso B se encuentran disueltas 6 moléculas de azúcar que se muestran submicroscópicamente como:

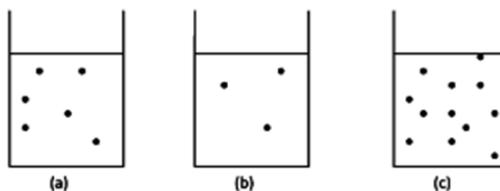


Vaso B

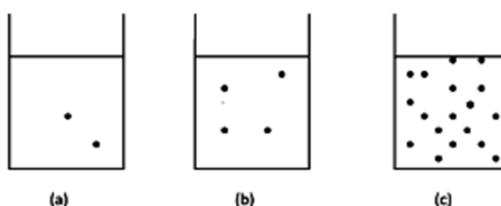
(i) ¿Cuál de las siguientes alternativas representa al vaso A, si en ambos vasos hay la misma concentración?



(ii) ¿Cuál de las siguientes alternativas representa al vaso A, si en el vaso A hay la mitad de la concentración de azúcar que en el vaso B?



(iii) ¿Cuál de las siguientes alternativas representa al vaso A, si en el vaso A hay un tercio de la concentración de azúcar que en el vaso B?



Fuente: de Berg (2012).

Los porcentajes de respuestas correctas a estos tres ítems fueron 31, 24 y 23 % respectivamente. Curiosamente, los estudiantes fueron más exitosos en resolver los problemas de tipo verbal. Uno de los factores que explican esa diferencia fue atribuido a los distintos formatos de presentación: un formato de elecciones múltiples para el problema con representaciones submicro y un formato de respuesta corta para el problema verbal.

En particular, en estos estudios que se dedicaron a analizar la comprensión a nivel submicroscópico de las disoluciones acuosas (DEVETAK et al., 2009; DE BERG, 2012), se encontró que algunos estudiantes focalizaban en el número de partículas más que en el número de partículas por unidad de volumen.

Adadan y Savasci (2012) incluyeron dos ítems sobre concentración en la investigación llevada a cabo con estudiantes de secundaria. Los ítems empleaban representaciones de moléculas de azúcar, a través de puntos y triángulos, incluidas en círculos que magnificaban un pequeño volumen de disolución en los cuales se puede contar el número de moléculas. En el primer ítem (Figura 4) el cambio que sufre la disolución es una dilución al doble de volumen. El 84% seleccionó la respuesta correcta en la dilución aunque solo el 51% fundamentó a forma apropiada.

Figura 4: Primer problema sobre concentración

En la figura A se representan 500 mL de una disolución de azúcar en agua. Los puntos en los círculos magnificados representan moléculas de azúcar. Las moléculas de agua no se muestran para simplificar los diagramas. En la figura B el volumen de la disolución se llevó al doble agregando 500 mL de agua.

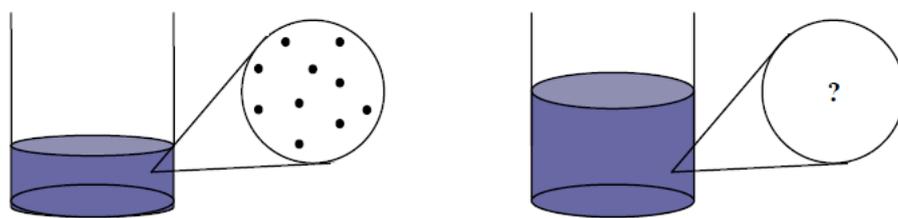
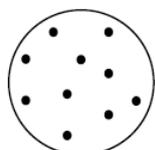


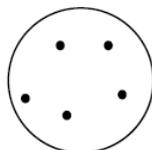
Figura A

Figura B

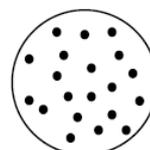
¿Cuál de los siguientes círculos magnificados mejor representa la disolución B, después del agregado de 500 mL de agua?



(a)



(b)



(c)

Fuente: Adadan y Savasci (2012).

En el segundo ítem (Figura 5) el cambio que sufre la disolución es la extracción de un cuarto del volumen de la disolución. En este caso el 56% seleccionó la respuesta correcta y el 51% justificó a forma apropiada.

Figura 5: Segundo problema sobre concentración

En la Figura 1 se representan 2 L de una disolución 1 mol/L de azúcar en agua. Los triángulos negros representan moléculas de azúcar. Las moléculas de agua no se muestran para simplificar los diagramas. La Figura 2 muestra la disolución luego de que un cuarto de la misma fue extraído.

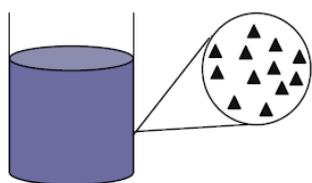


Figura 1

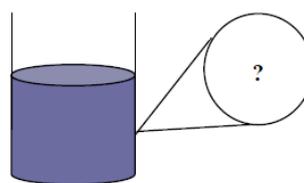


Figura 2

¿Cuál de los siguientes círculos magnificados mejor representa la disolución de 2 L, después de que un cuarto de la disolución fuera extraído?



(a)



(b)



(c)

Fuente: Adadan y Savasci (2012).

En este trabajo identificaron las siguientes concepciones alternativas: (a) si el volumen de la disolución aumenta por dilución, la cantidad de soluto disuelto por unidad de volumen decrece porque el agua adicional incrementa la solubilidad del azúcar (21%) y (b) si se extrae un cuarto del volumen de la disolución de azúcar, la cantidad de azúcar por

unidad de volumen aumenta (32%). La primera concepción alternativa fue atribuida a que estos estudiantes conciben a las representaciones de las moléculas como granos de azúcar sin disolver y por ello, con el agregado de agua, disminuye el número de granos no disueltos. Esta idea, que al diluir una disolución el soluto se disuelve más, fue encontrada también en alumnos universitarios en el estudio de Niaz (1995) utilizando enunciados que indagaban sobre la molaridad sin utilizar diagramas de partículas. La segunda concepción fue explicada por la suposición de estos estudiantes interpretaron que se extraía de la disolución solo agua y que las moléculas de azúcar que existían en la disolución original permanecían en la disolución resultante.

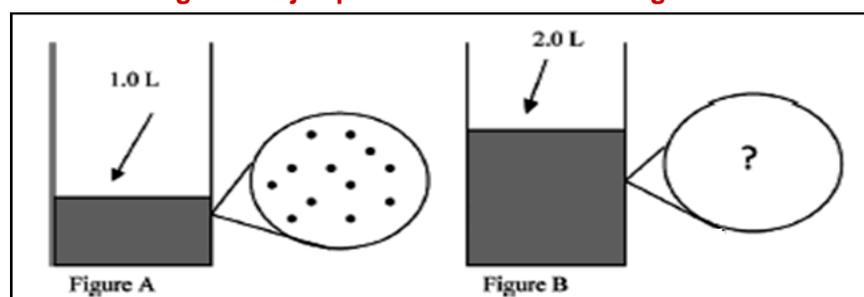
Discusión sobre el uso de diagramas de partículas para indagar la comprensión del concepto de concentración

Algunas de las dificultades y concepciones alternativas, encontradas en investigaciones que evalúan la comprensión conceptual del concepto concentración empleando diagramas de partículas, como las presentadas en el apartado anterior, pueden tener su origen en las características de esas representaciones. Muchas de las representaciones a nivel submicroscópico resultan confusas dado que combinan aspectos macroscópicos con entidades submicroscópicas; por ejemplo, en una disolución acuosa el volumen donde se representan las moléculas de soluto queda delimitado por las paredes del recipiente y la superficie horizontal de la disolución líquida, esto se aprecia en los diagramas empleados por de Berg (2012). Este hecho fue señalado por Andersson (1990) como fuente de concepciones erróneas, que tiende a reforzar la naturaleza continua de la materia. Otro aspecto señalado como confuso es que se muestran fenómenos a nivel atómico con muy pocas partículas alejándose de la realidad (BEN-ZVI et al., 1988).

En otro ítem, evaluado también por de Berg (2012), se solicitó a los estudiantes universitarios que seleccionaran la imagen que mejor representaba a seis moléculas de azúcar disueltas en agua. Las opciones consistieron en cuatro rectángulos, tres de ellos con distintas distribuciones de las seis moléculas y el cuarto rectángulo se muestra vacío. El 28% seleccionó esta última opción, justificando que las moléculas no se ven. El autor atribuyó esta respuesta a la potente influencia de las imágenes macroscópicas de la disolución azúcar-agua, que se potencia con la confusión que genera que las moléculas se dibujen dentro de contenedores con forma de recipientes macroscópicos. Esto no significa que estos estudiantes piensen, como los niños pequeños, que el soluto desapareció (no conservación de las sustancias), sino su elección se debe a la influencia del recipiente que induce a pensar que si se ve el recipiente las moléculas no se ven.

El uso del círculo magnificado (la “lupa atómica”) es una buena opción para superar algunos de los cuestionamientos anteriores. Por ejemplo, el uso que hacen de ella en las indagaciones de Adadan y Savasci (2012) y Mulford y Robinson (2002). En este último trabajo no aparecen los resultados obtenidos para el ítem de concentración. En la Figura 6 se muestra un ítem, de este último artículo, en el que se solicita dibujar las moléculas de soluto, aunque no se aclara en el enunciado que ambos círculos magnificados son iguales. Es frecuente cuando se compara el número de partículas en dos volúmenes en círculos magnificados que no se advierta explícitamente que dichos volúmenes son iguales.

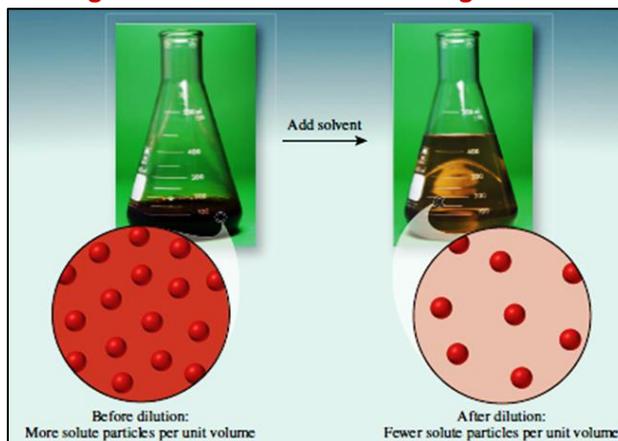
Figura 6: Ejemplo de uso de círculo magnificado



Fuente: Mulford y Robinson (2002).

Otro ejemplo de combinación de atributos macroscópicos con submicroscópicos en una misma imagen se puede encontrar en un libro de texto de reciente edición (Figura 7). En la misma, se emplean círculos magnificados en donde la intensidad del color de fondo indica la concentración y dicho color coincide con el color con que se dibujan las partículas. Estas imágenes transmiten ideas erróneas como podría ser: “el azúcar se ve blanca porque las moléculas son blancas”. Esto refuerza la tendencia de los estudiantes de asignar rasgos perceptibles a entidades no perceptibles y a no aceptar la idea que entre las partículas hay vacío.

Figura 7: Imagen de libro de texto con imagen submicroscópica



Fuente: imagen 4.11 del libro de texto Chemistry de Burdge (2020).

Chittleborough y Treagust (2008) informaron que los estudiantes con escaso conocimiento químico previo lidian al tratar de comprender los diagramas del nivel submicroscópico, y que esto no es sorprendente teniendo en cuenta su falta de familiaridad con el simbolismo y las convenciones de uso frecuente, las cuales no son explicadas en los diagramas químicos. Los diagramas de partículas son imágenes abstractas que involucran mucha información implícita, que requiere de explicitación o traducción (RAVIOLO, 2019). En la enseñanza basada en estos diagramas es importante consensuar en la información implícita contenida, lo que representa el simbolismo empleado y las convenciones utilizadas en su diseño dado que muchas de las dificultades pueden deberse a cuestiones de interpretación más que a confusiones relacionadas a lo conceptual.

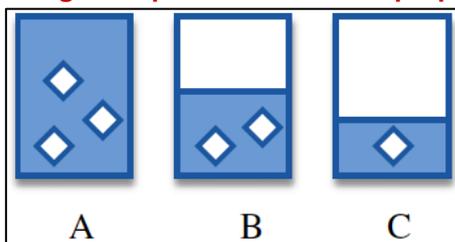
El empleo de diagramas de partículas para una disolución acuosa requiere acordar con los estudiantes sobre la siguiente información implícita: (a) el círculo magnificado corresponde a un volumen muy pequeño, el contorno de este círculo no está representando las paredes de un recipiente, (b) las esferitas representan átomos, moléculas o iones, que se encuentran en movimiento, (c) esas partículas son indivisibles en los cambios que se abordan, no son granos, (d) las partículas de soluto están rodeadas de moléculas de agua, (e) las moléculas de agua no se han dibujado para simplificar el dibujo (la imagen resultante es igual que la que se emplearía para representar un gas), (f) las partículas de soluto se distribuyen uniformemente en el volumen considerado.

La relevancia de la información implícita que conllevan estos diagramas se pone de manifiesto en el hecho de que en otras investigaciones las “partículas” si representan terrones de azúcar, como en el estudio llevado a cabo por Hilton et al. (2013) sobre la proporcionalidad en educación matemática. Si bien es en otro contexto, este tipo de imagen podría generar confusiones en novatos. Así, se puede entender por qué en investigaciones como las de Adadan y Savasci (2012) algunos estudiantes concebían a los puntos o pequeños círculos que representaban moléculas de azúcar, como granos de azúcar, es decir como algo macroscópico.

En el problema presentado por Hilton et al. (2013) (Figura 8) se dice que representa a tres tasas una llena de agua con tres terrones de azúcar, otra a la mitad de agua con dos

terrones y la tercera con un tercio de agua y un terrón, y se pregunta cuál de ellas tendrá el gusto más dulce después de mezclar.

Figura 8: Imagen empleado en tarea de proporcionalidad



Fuente: Hilton et al. (2013).

En general, el problema de interpretación de estos diagramas es que el estudiante enfrenta a una imagen plana, donde debe considerar a los puntos como partículas materiales con masa y volumen propio y a los rectángulos o círculos (dos dimensiones) como un volumen (tres dimensiones); y traducir a una concentración superficial de número de puntos por unidad de superficie en una concentración de número de partículas por unidad de volumen. Y con todo ello dar un salto a lo macroscópico y afirmar por ejemplo que la disolución resultante tendrá el doble de concentración. Todo este proceso, que implica la comprensión de las consignas, tiene que ser enseñado de una forma sistemática.

Esta influencia de las consignas, y el tipo imágenes que incluyen, puede explicar el hecho de que se obtuvieran en la investigación de Berg (2012), ante una misma situación conceptual (ej. la dilución al doble de volumen), mejores resultados con el formato de presentación verbal de respuesta corta que con el formato de diagramas de partículas.

En algunas discusiones sobre los tres niveles de representación de la química (macroscópico, simbólico y submicroscópico) se asocian estos niveles respectivamente con las siguientes acciones: observación, representación y explicación-interpretación. Al respecto hay que tener en cuenta que la interpretación de los fenómenos químicos no queda reducida solo al nivel de representación submicroscópico (TALANQUER, 2011). Las explicaciones en química no se limitan solo a ese nivel de representación, también se emiten explicaciones centradas en los niveles macro y simbólico poniendo en juego variables o propiedades macro del sistema estudiado. Teniendo en cuenta esto, y la ambigüedad de las representaciones submicroscópicas, y que pueden indagarse las concepciones de los estudiantes a partir de enunciados verbales, en la investigación que hemos llevado a cabo el instrumento utilizado se basa en las relaciones entre las variables macroscópicas involucradas en los conceptos de concentración molar y de concentración gramos sobre litro.

REPRESENTACIONES DE ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS SOBRE EL CONCEPTO DE CONCENTRACIÓN

Metodología

En el marco de una investigación sobre la enseñanza y aprendizaje del concepto de concentración se confeccionaron y administraron dos cuestionarios a estudiantes argentinos de primer año de universidad (RAVILOLO; FARRÉ, 2018; RAVILOLO, et al., 2020). El primer cuestionario denominado "Razonando con molaridad" fue contestado por 303 estudiantes con edad promedio de 20,5 años; el segundo, denominado "Razonando con concentración en gramos por litro" fue resuelto por 140 estudiantes de edad promedio 21,4 años. Ambas muestras de estudiantes pertenecen a cursos de Química General que accedieron voluntariamente a participar de esta investigación. Estos instrumentos indagan las relaciones lógico-matemáticas entre las variables de la concentración. En el caso de

molaridad, las relaciones entre n , V y M y en el caso de la concentración en gramos sobre litro las relaciones entre m , V y $C_{g/L}$. Cada cuestionario presenta 6 ítems de proporcionalidad de comparación cualitativa. A continuación (Cuadro 1) se muestra un ítem de cada uno de los cuestionarios.

Cuadro 1: Ejemplos de ítems de cuestionarios empleados sobre concentración

- | |
|---|
| 1) ¿Cuál de las siguientes disoluciones de concentración 2,0 g/L tiene mayor cantidad de gramos de soluto?
a. 300 mL
b. 500 mL
c. 100 mL |
| 5) ¿Cuál de las siguientes disoluciones tiene mayor molaridad M , si en todas hay 0,10 moles de soluto?
a. 100 mL
b. 300 mL
c. 500 mL |

Fuente: Propia.

Durante la administración de estos instrumentos, se indica a los estudiantes que deben resolverlos mentalmente, sin calculadora y sin realizar cálculos en la hoja. Con lo cual el objetivo de estos instrumentos fue evaluar la comprensión conceptual de los estudiantes sobre la concentración de disoluciones focalizando en si establecen las relaciones adecuadas entre las variables.

Un subconjunto de estas muestras participaron de entrevistas con protocolos de pensar en voz alta. Fueron seleccionados los primeros 18 estudiantes de cada muestra que aceptaron participar voluntariamente de las entrevistas. Estos 36 estudiantes cursaban la asignatura Química General de las Universidades Nacionales de Río Negro y del Comahue de la ciudad de Bariloche, a cargo del mismo profesor y con el mismo enfoque de enseñanza. En los meses previos, estos estudiantes habían asistido a clases teóricas, de resolución de problemas, prácticas de laboratorio y rendido al menos un examen que incluyó la resolución de problemas o ejercicios de cálculo de concentración de disoluciones con distintas unidades.

Las entrevistas de pensar en voz alta son útiles para recolectar información acerca de los procesos cognitivos que una persona sigue durante la resolución de un problema (HERRINGTON; DAUBENMIRE, 2014). Estas entrevistas se llevaron a cabo con la finalidad de indagar en los conocimientos, estrategias y razonamientos que emplearon los estudiantes al responder el cuestionario. El procedimiento seguido consistió en entregar el cuestionario resuelto por ellos, sin modificación posterior, y se les preguntó cómo habían resuelto cada uno de los 6 ítems comenzando en el orden del cuestionario. Las entrevistas, que tuvieron una duración promedio de 10 minutos, fueron grabadas en audio y completamente transcritas. Al finalizar la entrevista, se les preguntó si recurrían a algún tipo de representación, si se imaginaban algo concreto mientras resolvían los distintos ítems del cuestionario. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en esta última pregunta, sobre las representaciones que aluden o recurren los estudiantes al hacer frente a problemas o situaciones sobre concentración de disoluciones.

El análisis de las transcripciones de las entrevistas fue realizado en forma independiente por cada uno de los investigadores, cada uno identificó categorías que luego fueron comparadas y discutidas hasta arribar a categorías consensuadas finales. Finalmente se volvió a los datos para cuantificar la aparición de estas categorías y extraer ejemplos de párrafos que ilustran cada categoría.

Resultados

Las respuestas de los 36 entrevistados fueron clasificadas en 6 categorías. En el Cuadro 2 se presentan dichas categorías, el número de estudiantes que adhieren a ellas y algunos ejemplos de transcripciones.

Cuadro 2: Resultados obtenidos en las entrevistas

Categorías	Ejemplos
a- Procesos: trabajo en laboratorio, mediciones, dilución, disolución de sal, preparación de la disolución, preparación de jugo: (9 estudiantes)	<p>“A veces me imagino las cosas con las que trabajamos en el laboratorio como las pipetas, las probetas” (A2)</p> <p>“Las veces que fuimos al laboratorio, yo que aprendo más visualmente me sirve más ver una imagen que verlo así” (A9)</p> <p>“Cuánta sal pongo y lo diluyo en tanta cantidad de agua” (A17)</p>
b- Objetos: recipientes, frascos, frasco con agua, volumen de agua, litro de solución: (4 estudiantes)	<p>“Me imagino un frasco con agua o un recipiente con volumen de agua y bueno tengo tanta cantidad de soluto” (A15)</p> <p>“Me imagino un litro de una solución y me imagino que tiene mayor número de moles del soluto... al ser mayor molaridad va a estar tomando una porción menor del litro ese que en el resto y así me lo imagino” (A31)</p>
c- Elementos: cosas por recipiente, pelotitas, partículas (no moléculas): (5 estudiantes)	<p>“Me lo imaginé con pelotitas, entonces tengo lo mismo (volumen), en este tengo 10 pelotitas, en este 20 pelotitas y en este 40 pelotitas” (A19)</p> <p>“Entonces yo sé que si tengo el mismo volumen es porque tengo más cositas juntas, mayor número de moles de soluto tengo que tener más cositas juntas... me imagino partículas, no moléculas en sí, porque si no también tendría que representar las del agua” (A29)</p> <p>“Tiene más partículas disueltas en más volumen en cambio en esta, tiene las mismas partículas pero en menos volumen. La que tiene más partículas en menos volumen es la más concentrada” (A35)</p> <p>“Es como si fuese densidad... claro más cantidad de bolitas por unidad de volumen” (A36)</p>
d- Propiedades: intensidad de color de la disolución, apariencia: (2 estudiantes)	<p>“Me imagino un Erlenmeyer con agua y con un líquido con color... mientras más clarito se vea más diluido” (A28)</p> <p>“Una más espesa que la otra porque tiene mayor soluto por ejemplo” (A14)</p> <p>En las siguientes categorías los entrevistados no explicitaron representaciones sobre materiales concretos, se refirieron a números o a razonamientos de proporcionalidad entre variables macroscópicas.</p>
e- Números: cuentas, cálculos mentales: (11 estudiantes)	<p>“Si los números, las relaciones, no algo físico” (A1)</p> <p>“Lo veo más numérico. Pero también bueno, yo estudié matemática entonces lo veo como una cuenta después cuando lo veo en el laboratorio y digo claro, es lo mismo. Pero si está en papel es una cuenta” (A6)</p> <p>“Pienso en números, hago la... dentro de la cabeza comienzo a imaginar cómo es, después la plasmo en</p>

papel” (A11)
“Lo hago mental, cálculos mentales, hago la regla de tres en mi cabeza y lo veo más o menos visual” (A30)

f- Relaciones: “Si tengo el mismo volumen tiene que ser menor la cantidad de moles para que tenga menor molaridad” (A24)
razonamientos con variables macroscópicas, sin emplear números y sin hacer mención a objetos materiales: (5 estudiantes) “Depende de cuál estás haciendo porque por ahí si me dan los gramos de soluto y la cantidad de solución me resulta más fácil imaginarlo que si me dan la concentración de gramos en litros” (A10)
“Si queremos que tenga una molaridad mayor, o sea más concentrada, la menor cantidad de volumen de agua, de líquido” (A32)

Fuente: Propia.

Discusión sobre los resultados de las entrevistas sobre representaciones

El principal hallazgo de las entrevistas es que ningún entrevistado se refirió espontáneamente a partículas submicroscópicas: átomos, iones o moléculas. A pesar de que a esa altura del cuatrimestre habían tomado contacto durante la enseñanza, en forma expositiva y a través de diapositivas y animaciones, de situaciones con representaciones de partículas, en los temas: estados de la materia, elemento, compuesto y mezcla, reacciones químicas, disolución de sal en agua y gases. Además, la enseñanza que recibieron estos alumnos se apoyó en el libro de texto de Química de Chang, que muestra en todos sus capítulos muchas representaciones y situaciones con partículas.

Lo novedoso de esta investigación, con respecto a otras, es que indaga sobre las representaciones de los estudiantes cuando ellos están razonando sobre las relaciones entre las variables macroscópicas del concepto de concentración. En apartados anteriores se discutió lo que ocurre cuando se le presentan a estudiantes diagramas que incluyen partículas.

En general los libros de texto de química de primer año de universidad presentan pocas imágenes sobre aspectos conceptuales de la concentración de disoluciones (RAVILOLO; FARRÉ, 2020). Por ejemplo, en el capítulo 4 de Química de Chang se encuentran solo tres imágenes relacionadas al concepto de concentración: (1) una foto de disoluciones de distintas concentraciones del mismo soluto que se perciben por diferente intensidad de color, (2) un diagrama sobre el procedimiento de preparar una disolución de una determinada concentración molar en un matraz aforado a partir del soluto sólido, y (3) una imagen sobre el proceso de dilución a nivel submicroscópico que muestra las partículas de soluto “inmersas” en el líquido en un vaso de precipitado. Teniendo en cuenta que en los problemas del final de capítulo hay muchos que incluyen diagramas de partículas, pero ninguno sobre la concentración, se observa que el abordaje del concepto de concentración a través de representaciones con partículas es un aspecto prácticamente no tenido en cuenta.

Las representaciones visuales externas que presentan los textos constituyen lenguajes en términos de Lemke (2006). Este autor destaca que la ciencia no habla del mundo solo con el lenguaje de las palabras sino con una combinación de formatos, que incluyen, ecuaciones, imágenes, tablas y diagramas; y que estos lenguajes tienen que ser enseñados y ser integrados con la intención de construir significados.

Por otro lado, se aprecia en los resultados de las entrevistas que no hay una representación mayoritaria común. Los estudiantes no recurren a la misma representación interna o imagen sobre la concentración, y que estas representaciones hacen referencia a objetos, propiedades o procesos macroscópicos.

Para Pozo et al. (1991) el hecho de que los estudiantes no utilicen en forma espontánea la idea de partícula en sus explicaciones ante situaciones con disoluciones se debe a dificultades relacionadas con las nociones de continuidad y discontinuidad de la materia. Desde la década de los 80 se viene sugiriendo la presentación sistemática de descripciones con diagramas de partículas (por ejemplo, en el artículo de Gabel, Samuel y Hunn, 1987) sin embargo, su implementación en el tema concentración de disoluciones sigue siendo muy limitado.

Por otro lado, estudiantes que hacen referencia a pelotitas, bolitas o cosas por recipiente estarían, en términos de Pozo (2002, 2017) en una etapa de explicitación de suspensión representacional dado que suspenden características o partes de la representación y se reemplazan por análogos, con lo que combinan representaciones.

En definitiva, dado que la cantidad de representaciones con partículas sobre la concentración, a las que están expuestos los estudiantes, es escasa y que muchas de ellas fomentan confusiones entre lo macro y lo micro, es esperable que muchos estudiantes mantengan imágenes continuas sobre la materia como concepción implícita y, ante una situación, confíen solo en imágenes macroscópicas.

Para que se almacenen en la memoria de largo plazo representaciones adecuadas desde el punto de vista científico, debe promoverse el esfuerzo cognitivo de integrar, en la memoria de trabajo, palabra e imagen, representaciones verbales y pictóricas, y relacionarlas con el conocimiento previo. Esto fomenta la construcción de aprendizajes más profundos, que van más allá del recuerdo y que permiten su aplicación o transferencia a otras situaciones o problemas (MAYER, 2009). Para ello, ambos tipos de información deben abordarse en forma sistemática y complementaria, haciendo hincapié en la narración explicativa de las imágenes. Esto último se ve obstaculizado por la concepción ingenua, que mantienen implícitamente muchos docentes, de que las imágenes son sencillas y autoevidentes y por lo tanto no necesitan ser explicadas (OTERO et al., 2003).

La resolución algorítmica basada fórmulas y la resolución numérica mecánica, pueden ocultar dificultades subyacentes en la comprensión de los aspectos conceptuales de la concentración. Los estudiantes que están dependientes de los materiales concretos o de los números no logran abstraer totalmente y en profundidad el concepto de concentración y aplicarlo eficientemente en distintas situaciones. Los estudiantes que aluden a procesos macroscópicos (como la preparación de la disolución) traslucen una visión dinámica de la concentración, al no poder focalizarse en el sistema, en la mezcla homogénea, y analizar correctamente la relación entre sus variables.

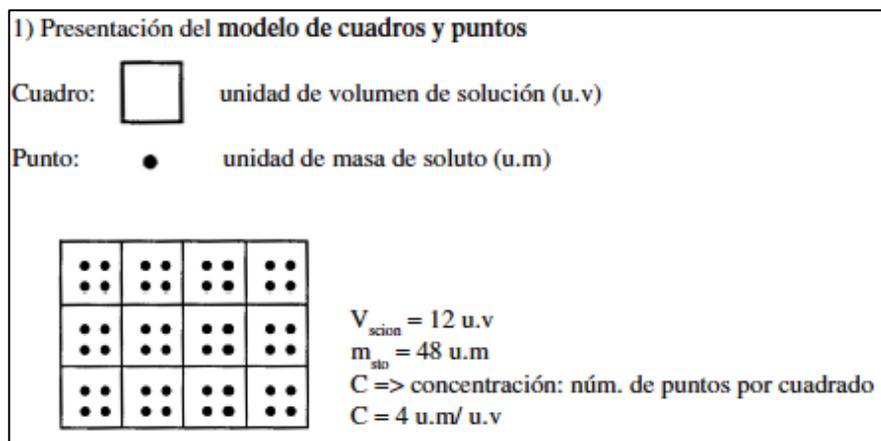
IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO CONCENTRACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES

Tanto las investigaciones sobre las concepciones alternativas de los estudiantes sobre el concepto de concentración como la indagación que hemos llevado a cabo, muestran que no puede dejarse librado a que los alumnos construyan solos representaciones internas adecuadas sobre el tema. Es necesario llevar adelante acciones sistemáticas en la enseñanza.

En tal sentido, resultan útiles los modelos analógicos didácticos, como el modelo de cuadros y puntos (RAVILOLO et al., 2004), dado que es una representación genérica, que facilita abstraerse de lo macroscópico y focalizar en lo conceptual. En dicho artículo se encuentran actividades con este modelo incluyendo la preparación de una disolución de una concentración determinada a partir de otra más concentrada. Este modelo de cuadros y puntos, como su nombre lo indica, asigna a cuadrados iguales la unidad de volumen de solución y a puntos iguales la unidad de masa de soluto; la cantidad de puntos por unidad de volumen constituye la unidad de concentración (u.m/u.v). Este modelo está inspirado en el trabajo de Smith, Snir y Grosslight (1992), que presentaron un modelo similar para el

concepto de densidad. Estos modelos están contruidos sobre una analogía visual que tiene la misma estructura de relaciones entre variables que el concepto físico a abordar, lo que puede promover la suspensión representacional en la progresión a la redescrición de las mismas.

Figura 9: Modelo de cuadros y puntos



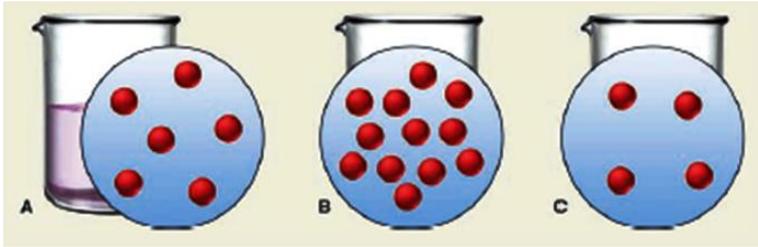
Fuente: Raviolo et al. (2004).

En coincidencia con Chandrasegaran et al., (2009), para abstraer los conceptos los estudiantes tienen que estar expuestos a múltiples representaciones de un fenómeno incluyendo diagramas submicroscópicos y modelos físicos y que estos diagramas deben cumplir una función explicativa más que ilustrativas o decorativas. Para ello resulta conveniente combinar tareas de interpretación de diagramas con tareas en las que los alumnos construyen sus propios diagramas.

Se recomienda el abordaje sistemático de situaciones conceptuales, como la que se muestra en la Figura 10.

Figura 10: Problema de libro de texto de química general

Explique los cambios que deben ser hechos a la disolución A para obtener las disoluciones representadas en B y en C. Los círculos representan una unidad de volumen de disolución.



Fuente: Problema 3.18 del libro de texto Chemistry de Silberberg (2009).

Al utilizar diagramas de partículas se deben tener en cuenta todos los aspectos y precauciones discutidas sobre los mismos anteriormente y, fundamentalmente, hacer hincapié en la definición submicroscópica de concentración como número de partículas de soluto por unidad de volumen. También es importante aplicar este concepto en distintos cambios que se le pueden realizar a una disolución como el agregado de más soluto (a volumen constante), el agregado de más solvente (a cantidad de soluto constante), la extracción de parte de la disolución, el agregado de un volumen de disolución (de igual, mayor o menor concentración).

Las animaciones y simulaciones son otras herramientas valiosas, por ejemplo las simulaciones del entorno de PhET (PERKINS et al., 2006), que permiten la modificación de distintas variables y observar su efecto sobre la concentración. O las animaciones de VisChem (TASKER; DALTON, 2006), que ofrecen unas imágenes dinámicas y más “saturadas” de partículas dado que brindan la opción de incluir a las moléculas del solvente (agua).

Estas actividades deben ser complementarias a actividades experimentales sencillas, que incluyan procesos como: preparación de disoluciones en distintas unidades de concentración, dilución y evaporación de disoluciones, mezcla de disoluciones de distinta concentración, etc.; las cuales deben problematizarse con preguntas del tipo: ¿cuál es más concentrada? ¿cuál tiene mayor cantidad de soluto? ¿cómo explicarías a nivel partículas? De esta forma fomentar la integración de los diferentes niveles de representación de una manera adecuada como lo podría hacer un experto, y promoviendo que la proporcionalidad vaya más allá de una relación matemática y tenga sentido químico.

En las disoluciones además de mezclar soluto y solvente se “mezcla realidad y modelo”. Dado que los estudiantes suelen confundir fenómenos reales con representaciones sobre ellos, resulta oportuno fomentar discusiones que permitan, en primer lugar, diferenciar observación e interpretación y, en una segunda etapa, relacionarlos adecuadamente. Los diagramas de partículas no son una foto, o captura directa de la realidad, sino una construcción abstracta.

A nivel universitario la concreción de estas sugerencias va a demandar superar la compartimentación entre teoría y práctica, dado que se asignan espacios y funciones distintas para clase teórica, clase de problemas y clase de laboratorio.

CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se ha justificado la necesidad de llevar adelante acciones sistemáticas en la enseñanza sobre aspectos conceptuales de concentración de disoluciones dado que, tanto las investigaciones sobre las concepciones alternativas como la indagación que hemos llevado a cabo, han expuesto que no puede dejarse librado a que los alumnos construyan solos representaciones internas adecuadas sobre el tema. Estas acciones deben contemplar la presentación de imágenes sobre los aspectos conceptuales y problemáticos, la discusión de las mismas, la negociación de significados y la transferencia a otras situaciones.

Los estudiantes no exteriorizan una única, o mayoritariamente compartida, imagen sobre la concentración porque no se les ha enseñado.

Si bien los diagramas de partículas son útiles para la enseñanza y la evaluación de las concepciones de los estudiantes, su implementación debe realizarse en forma cuidadosa, atendiendo a las limitaciones mencionadas, y complementaria a otros formatos como situaciones conceptuales con variables macroscópicas y situaciones experimentales problematizadas.

En este artículo se hallan muchas claves para analizar los aprendizajes de los estudiantes sobre el tema y llevar adelante una enseñanza que promueva procesos activos de razonamiento y representación.

REFERENCIAS

ADADAN, E.; SAVASCI, F. An analysis of 16–17-year-old students’ understanding of solution chemistry concepts using a two-tier diagnostic instrument. **International Journal of Science Education**, v. 34, n. 4, p. 513-544, 2012

ANDERSSON, B. Pupils' conceptions of matter and its transformation. **Studies in Science Education**, v. 18, p. 53-85, 1990.

BARKE, H.; HAZARI, A.; YITBAREK, S. **Misconceptions in Chemistry**. Berlin: Springer-Verlag, 2009.

BEN-ZVI, R.; EYLON, B.; SILBERSTEIN, J. Theories, principles and laws. **Education in Chemistry**, v. 25, p. 89-92, 1988.

BURDGE, J. **Chemistry** (5th Ed.). New York: McGraw Hill, 2020.

CALIK, M.; AYAS, A.; EBENEZER, J. A review of solution chemistry studies: Insights into students' conceptions. **Journal of Science Education and Technology**, v. 14, n. 1, p. 29-50, 2005.

CHANDRASEGARAN, A. L.; TREAGUST, D.; WALDRIP, B.; CHANDRASEGARAN, A. Students' dilemmas in reaction stoichiometry problem solving: deducing the limiting reagent in chemical reactions. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 10, p. 14-23, 2009.

CHITTLEBOROUGH, G.; TREAGUST, D. Correct interpretation of chemical diagrams requires transforming from one level of representation to another. **Research in Science Education**, v. 38, p. 463-482, 2008.

CLARK, R.; LYONS, C. **Graphics for learning** (2nd Ed.). San Francisco: Pfeiffer, 2011.

DAVIDOWITZ, B.; CHITTLEBOROUGH, G.; MURRAY, E. Student-generates submicro diagrams: a useful tool for teaching and learning chemical equations and stoichiometry. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 11, p. 154-164, 2010.

DE BERG, K. A study of first-year chemistry students' understanding of solution concentration at the tertiary level. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 13, p. 8-16, 2012.

DEVETAK, I.; VOGRINC, J.; GLAŽAR, S. Assessing 16-year-old students' understanding of aqueous solution at submicroscopic level. **Research Science Education**, v. 39, n. 2, p. 157-179, 2009.

GABEL, D. The complexity of chemistry and implications for teaching. In B. Fraser & K. Tobin (Eds.), **International handbook of science education** (p. 233-248). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998.

GABEL, D.; SAMUEL, K.; HUNN, D. Understanding the particulate nature of matter. **Journal of Chemical Education**, v. 64, n. 8, p. 695-697, 1987.

HERRINGTON, D.; DAUBENMIRE, P. Using interviews in CER projects: options, considerations, and limitations. In D. Bunce y R. Cole. **Tools of Chemistry Education Research** (p. 31-59), ACS Symposium Series, American Chemical Society: Washington, DC, 2014.

HILTON, A.; HILTON, G.; DOLE, S.; GOOS, M. Development and application of a two-tier diagnostic instrument to assess middle-years students' proportional reasoning. **Mathematics Education Research Journal**, v. 25, n. 4, p. 523-545, 2013.

KIND, V. **Beyond Appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas**. (2^o Edic.). Royal Society of Chemistry: UK, 2004. Disponible en: <https://edu.rsc.org/download?ac=15564> Consultado 10 de junio 2020.

LEMKE, J. Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 24, n. 1, p. 5-12, 2006.

MARTÍ, E.; POZO, J. I. Más allá de las representaciones mentales: la adquisición de los sistemas externos de representación. **Infancia y Aprendizaje**, v. 90, p. 11-30, 2000.

MAYER, R. E. **Multimedia learning** (2nd Ed.). New York: Cambridge University Press, 2009.

- MULFORD, D.; ROBINSON W. An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students. **Journal of Chemical Education**, v. 79, p. 739–744, 2002.
- NIAZ, M. Progressive transitions from algorithmic to conceptual understanding in student ability to solve chemistry problems: A Lakotasian interpretation. **Science Education**, v. 79, p. 19-36. 1995.
- NURRENBERN, S.; PICKERING, M. Concept learning versus problem solving: is there a difference? **Journal of Chemical Education**, v. 64, n. 6, p. 508-510, 1987.
- OTERO, M.; GRECA, I.; LANG DA SILVEIRA, M. Imágenes visuales en el aula y rendimiento escolar en Física: un estudio comparativo, **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v.2, p.1-30, 2003.
- PERKINS, K.; ADAMS, W.; DUBSON, M.; FINKELSTEIN, N.; REID, S.; WIEMAN, C.; LEMASTER, R. PhET: interactive simulations for teaching and learning physics. **The Physics Teacher**, v. 44, p. 18-23, 2006.
- POZO, J. I. La adquisición de conocimiento científico como un proceso de cambio representacional. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 3, p. 245-270, 2002.
- POZO, J. I. Learning beyond the body: from embodied representations to explicitation mediated by external representations. **Infancia y Aprendizaje**, v. 40, n. 2, p. 219-276, 2017.
- POZO, J. I.; GÓMEZ CRESPO, M.; LIMÓN, M.; SANZ SERRANO, A. **Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia: las ideas de los adolescentes sobre la química**. Madrid: C.I.D.E., 1991.
- RAVIOLO, A. Imágenes y enseñanza de la Química. Aportes de la Teoría cognitiva del aprendizaje multimedia, **Educación Química**, v. 30, n. 2, p. 114-128, 2019.
- RAVIOLO, A.; FARRÉ, A. Razonando con molaridad, **Educación en la Química**, v.24, n. 2, p. 126-136, 2018.
- RAVIOLO, A.; FARRÉ, A. Aprendizaje conceptual del tema concentración de disoluciones: análisis de imágenes de libros de texto universitario, **Educación Química**, v. 31, n. 3, p. 119-133, 2020.
- RAVIOLO, A.; SIRACUSA, P.; GENNARI, F.; CORSO, H. Utilización de un modelo analógico para facilitar la comprensión del proceso de preparación de disoluciones. Primeros resultados, **Enseñanza de las Ciencias**, v. 22, n. 3, p. 379-388, 2004.
- RAVIOLO, A.; TRAIMAN, N.; FARRÉ, A. La comprensión de estudiantes de primer año de universidad del concepto de concentración expresada en gramos por litro, **Enseñanza de las Ciencias**, en prensa, 2020.
- SILBERBERG, M. **Chemistry** (5th Ed.). New York: McGraw Hill, 2009.
- SMITH, C.; SNIR, J.; GROSSLIGHT, L. Using conceptual models to facilitate conceptual change: the case of weight-density differentiation. **Cognition and Instruction**, v. 9, n. 3, p. 221-283, 1992.
- SMITH, K.; METZ, P. Evaluating student understanding of solution chemistry through microscopic representations. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 3, p. 233-235, 1996.
- TALANQUER, V. Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry “triplet”. **International Journal of Science Education**, v. 33, n. 2, p. 179-195, 2011.
- TASKER, R.; DALTON, R. Research into practice: visualization of the molecular word using animations. **Chemistry Education: Research and Practice**, v. 7, n. 2, p. 141-159, 2006.
- WINK, D.; RYAN, S. The logic of proportional reasoning and its transfer into chemistry. En **It's Just Math: Research on Students' Understanding of Chemistry and Mathematics**. ACS: Symposium Series, 2019.