

## Comprensión de los estudiantes de la concentración molar

Andrés Raviolo, Andrea S. Farré y Nayla Traiman Schroh  
Universidad Nacional de Río Negro, Laboratorio de Investigación en Didáctica de las Ciencias Naturales (LIDCiN). Bariloche. Río Negro. Argentina.  
[araviolo@unrn.edu.ar](mailto:araviolo@unrn.edu.ar); [asfarre@unrn.edu.ar](mailto:asfarre@unrn.edu.ar); [ndtraiman@unrn.edu.ar](mailto:ndtraiman@unrn.edu.ar)

### Resumen

En este artículo se presentan y discuten los resultados obtenidos de una investigación que tiene como objetivo indagar, en estudiantes que cursan el primer semestre de universidad, la comprensión del concepto de concentración molar, luego de que este tema fuera enseñado y evaluado. La problemática del aprendizaje del concepto de concentración molar no ha sido abordada con anterioridad de una manera exclusiva y profunda. Se administró a 303 estudiantes argentinos de primer año de universidad el cuestionario "Razonando con molaridad" que indaga las relaciones lógico-matemáticas entre las variables  $n$ ,  $V$  y  $M$ . Se analizan también los resultados obtenidos en entrevistas think-aloud, sobre los ítems de este cuestionario, realizadas a 18 estudiantes. De los resultados obtenidos se desprende que aproximadamente la mitad de los estudiantes de primer año de universidad no poseen un conocimiento conceptual profundo de la molaridad. La principal dificultad yace en tareas de proporcionalidad inversa cuando deben relacionar cualitativamente el número de moles  $n$  (extensiva) y la molaridad  $M$  (intensiva) para determinar qué disolución ocupa un menor volumen. También se verificó que detrás de la estrategia de resolución numérica algorítmica de los problemas, llevada adelante en forma exclusiva por muchos estudiantes, se esconden confusiones conceptuales como la indiferenciación entre  $n$  y  $M$ .

**Palabras claves:** Concentración disoluciones, molaridad, proporcionalidad, aprendizaje.

### Introducción

La mayoría de los procesos biológicos y muchas reacciones químicas se producen entre sustancias que se encuentran disueltas, formando mezclas homogéneas o disoluciones. Para su estudio, debe tenerse en cuenta no solo los aspectos cualitativos sino también los aspectos cuantitativos de las disoluciones, vinculados con el concepto de concentración. Asimismo, el tema de concentración de disoluciones es muy importante porque es un concepto inicial y central en el currículo de química tanto en la escuela secundaria como en la universidad. Específicamente el concepto de concentración es un prerrequisito que se aplica en temas de la química tales como estequiometría, ácidos y bases, cinética química, equilibrio químico, electroquímica, por nombrar algunos (Calik et al., 2010). Sin embargo, no es un concepto que resulte sencillo para la mayoría de los estudiantes de nivel medio (Adadan & Savasci, 2012) y universitario (de Berg, 2012), lo cual es problemático considerando que es un concepto operativo básico en el trabajo

experimental en el laboratorio de química. Preparar una disolución de una concentración determinada constituye un objetivo primario en laboratorios de química general, aunque, es un procedimiento poco comprendido (Dunnivant et al., 2002).

En la revisión llevada a cabo por Gabel & Bunce (1994) se concluye que alumnos de secundaria no tienen una adecuada comprensión del tema disoluciones. No obstante, la mayoría de las investigaciones se han centrado en las ideas de los estudiantes sobre la naturaleza de las disoluciones y el proceso de disolución más que en sus aspectos cuantitativos. Por ejemplo, en el artículo de revisión bibliográfica sobre el aprendizaje del tema disoluciones químicas, llevada a cabo por Calyk, Ayas, & Ebenezer (2005), no se incluye al concepto de concentración.

Las dificultades en el aprendizaje del concepto de concentración han sido abordadas con estudiantes de secundaria por varios estudios (Adadan & Savasci, 2012; Calik, 2005; Devetak et al., 2009), hallándose pocos artículos sobre concentración molar en particular (Duncan & Johnstone, 1973; Gabel & Samuel, 1986; Heyworth, 1999). Las dificultades perduran incluso con alumnos universitarios, tanto para el concepto concentración (de Berg, 2012; Pinarbasi & Canpolat, 2003) como para el de molaridad (Niaz, 1995; Ryan, 2012). Dada la relevancia del concepto, y comparando con otros conceptos abordados en el campo de la investigación en enseñanza de la química, existen pocas investigaciones centradas en el aprendizaje del concepto de concentración en general y del concepto concentración molar en particular. Esto se acentúa especialmente en el nivel universitario, donde se aprecia la falta de investigaciones que se focalicen en el aprendizaje del concepto de molaridad, razón por la que en este artículo se pretende contribuir a este aspecto.

El aprendizaje del concepto de concentración fue indagado en algunos trabajos en el contexto de características generales de las disoluciones (ej.: Adadan & Savasci, 2012). Por su parte, el aprendizaje del concepto concentración molar ha sido indagado formando parte de investigaciones más amplias, por ejemplo en investigaciones centradas en: estequiometría y mol (Dahsah & Coll, 2008; Duncan & Johnstone, 1973; Johnstone, 1983; Khang & Sai, 2008), titulaciones (Anamuah-Mensah, 1986; Frazer & Servant, 1986; Vincent, 1981), resolución de problemas (de Berg, 2012; Gabel et al., 1984; Heyworth, 1999; Niaz, 1995), problemas análogos (Gabel & Samuel, 1986; Ryan, 2012) y razonamiento proporcional (Gabel et al., 1984; Ryan, 2012; Stavy, 1981).

De la revisión bibliográfica se aprecia, entonces, la carencia de artículos que indaguen en forma exclusiva y en profundidad la comprensión del concepto de concentración molar. Este artículo tiene como objetivo profundizar sobre la forma en que alumnos de primer año de universidad comprenden el concepto de molaridad, intentando articular los aportes realizados con distintas orientaciones, como la resolución de problemas o el aprendizaje conceptual, incluyendo también resultados de la investigación en educación matemática sobre proporcionalidad.

### ***El aprendizaje del concepto de concentración de disoluciones***

El concepto de concentración no resulta sencillo para muchos estudiantes (Calik, 2005) porque requiere el conocimiento de conceptos previos como sustancia y mezcla, mezcla homogénea, disolución, soluto, solvente, masa. Se debe entender que la concentración es una propiedad intensiva de la disolución; es decir, al ser la disolución una mezcla homogénea, la concentración es una propiedad constante, independiente de la extensión

del sistema considerada. Si, por ejemplo, se retira un poco de la misma, lo que queda sigue teniendo la misma concentración. En cambio, la masa de soluto y el volumen de disolución son variables extensivas porque su valor depende de la cantidad o extensión considerada. También se debe comprender que si se agrega soluto a la solución la concentración aumenta y, si se agrega solvente la concentración disminuye. Estas relaciones se establecen admitiendo una variable constante: (a) la concentración es directamente proporcional a la cantidad de soluto si el volumen de disolución permanece constante, y (b) la concentración es inversamente proporcional al volumen de la disolución si la cantidad de soluto permanece constante (Stavy, 1981).

Stavy & Tirosh (1996) analizaron la comprensión de las propiedades intensivas en conceptos como concentración y temperatura. Las tareas consistían en presentar a los sujetos dos sistemas idénticos en cierta propiedad intensiva pero que diferían en el tamaño. Niños de 6 a 10 años afirmaron que al mezclar dos volúmenes de disoluciones de azúcar con igual concentración, la mezcla resultante era más concentrada (más dulce). Justificaron sus respuestas en dos afirmaciones “el recipiente con más azúcar es el más dulce” y “el recipiente con más agua es el más dulce”.

Muchas concepciones erróneas sobre el tema disoluciones fueron detectadas a través de representaciones con partículas (ej. moléculas). A nivel submicroscópico la concentración es concebida como número de partículas por unidad de volumen. En algunos estudios en nivel medio (Devetak et al., 2009) y en nivel universitario (de Berg, 2012; Smith & Metz, 1996), se encontraron dificultades para identificar y relacionar correctamente estas variables, por ejemplo, algunos estudiantes focalizaban en el número de partículas más que en el número de partículas por unidad de volumen. En el estudio llevado adelante por Devetak et al. (2009) se obtuvieron mejores resultados si la situación presentada era a volumen constante y los estudiantes debían pensar solo en el número de partículas de soluto para arribar a la concentración, donde por ejemplo, tenían que dibujar el doble de partículas para obtener una disolución el doble de concentrada. Las dificultades fueron mayores en situaciones donde se presentaban dos volúmenes distintos, dado que los estudiantes tenían que relacionar dos variables, número de partículas y volumen, para por ejemplo obtener dos disoluciones de la misma concentración.

También empleando representaciones submicroscópicas, Adadan & Savasci (2012) incluyeron un ítem sobre concentración en el cual una disolución era diluida al doble de volumen. En las repuestas, de los alumnos de secundaria, identificaron la siguiente concepción alternativa: “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”. Esta concepción fue atribuida a que estos estudiantes concebían a las representaciones de las moléculas como granos de azúcar sin disolver y por ello, con el agregado de agua, disminuía el número de granos dado que se disolvía y consecuentemente no aparecerían en la representación. Esta idea, que al diluir una disolución el soluto se disuelve más, fue encontrada también en alumnos universitarios en el estudio de Niaz (1995) al analizar las estrategias para resolver ejercicios de química sin emplear representaciones pictóricas.

Algunas de las dificultades encontradas pueden tener su origen en las características de las representaciones submicroscópicas utilizadas para evaluar la comprensión del concepto concentración, dado que éstas resultan confusas al combinar aspectos

macroscópicos con entidades submicroscópicas (Andersson, 1990). Al respecto, la interpretación de los fenómenos químicos no tiene que necesariamente ser reducida al nivel de representación submicroscópico. Las explicaciones en química pueden centrarse en los niveles macro y simbólico poniendo en juego variables o propiedades macro del sistema estudiado (Talanquer, 2011).

### ***Dificultades en la comprensión de la concentración molar***

La concentración molar o molaridad es una medida de la concentración de un soluto en una disolución, en particular el número de moles de soluto por litro de disolución. Su unidad es mol/L o molar (M) y se expresa través de la fórmula  $M = n/V$ . El aprendizaje de esta magnitud dependerá de la comprensión que se tenga de los conceptos que forman parte de su definición, especialmente, de la magnitud  $n$  (cantidad de sustancia) y su unidad mol.

La preocupación por las dificultades en el aprendizaje del mol es un tema recurrente en la investigación (Dierks, 1981; Novick & Menis, 1976; Strömdahl et al., 1994). Los estudiantes como producto de la instrucción recibida: (a) perciben al mol como una masa, o como el número de Avogadro (Staver & Lumpe, 1995), (b) asocian el mol solo con moléculas, no con átomos u otras entidades (Krishnan & Howe, 1994); (c) no diferencian los conceptos molécula y mol (Dahsah & Coll, 2008) y (d) sostienen que si dos sustancias tienen la misma masa, tienen el mismo número de entidades submicroscópicas (Dahsah & Coll, 2008).

Para Fang et al. (2014) la comprensión del concepto mol va más allá de simplemente ser capaz de articular su definición SI, dado que incluye conceptos como masa atómica o molecular relativa, masa molar y la conexión entre ellas, que a su vez involucran conceptos como masa, átomo y molécula. Dichos autores adjudican las dificultades de aprendizaje al hecho de que, para un elemento dado, la masa molar en gramos, la masa atómica relativa y la masa de un átomo en unidades de masa atómica tienen el mismo valor numérico, y a la alta demanda cognitiva que requiere integrar el nivel macroscópico de la cantidad de sustancia con las nociones relativas al nivel atómico-molecular.

En una revisión de la bibliografía, se puede constatar la existencia de escasos antecedentes referidos a la comprensión de la molaridad, sobre todo por alumnos universitarios. Además, la mayoría de los artículos que versan sobre el tema son anteriores al año 2000 y como se señaló en la introducción, lo trataban como parte de una investigación más amplia. Dentro de las publicaciones encontradas, una de las primeras que abordó las dificultades en el aprendizaje de la concentración molar fue el estudio sobre el aprendizaje del concepto mol de Duncan & Johnstone (1973). Los resultados, obtenidos con estudiantes de nivel medio, indicaron que un 59% definían la concentración molar como moles de soluto por litro de agua. Dos tercios de los estudiantes pudieron calcular qué solución era más concentrada si los datos incluían mL de disolución y moles de soluto; en cambio, si los datos eran mL de disolución y molaridad solo el 45% respondió correctamente. Al preguntarles qué disolución contiene más soluto, a partir de datos de mL de disolución y  $M$ , un 38% respondía correctamente y, aproximadamente un 50% no tuvo en cuenta el volumen y consideró que tiene más moles la de mayor concentración. Las dificultades se atribuyeron al

desconocimiento de la definición de molaridad y a confusiones entre molaridad y número de moles.

Johnstone (1983) preguntó a estudiantes de 16 años, cuál de las siguientes disoluciones de cloruro de sodio es la más concentrada: (a) 1000 mL 2 M, (b) 800 mL 3 M, (c) 500 mL 4 M o (d) 200 mL 5 M. La mitad de los estudiantes contestaron que era la opción b, es decir, la que tiene más número de moles. Con ítems similares, Schmidt (1984) y Dahsah & Coll (2008) hallaron también la confusión entre número de moles y molaridad.

La persistencia de los estudiantes en no diferenciar cantidad de sustancia (número de moles) de concentración (molaridad) se observó, por ejemplo, en el aprendizaje del tema titulaciones (Frazer & Servant, 1986; Vincent, 1981) y pH (Khang & Sai, 2008). Esta confusión se detectó también en dos tercios de los alumnos entrevistados sobre el equilibrio químico en el estudio realizado por Bergquist & Heikkinen (1990) y al aplicar el principio de Le Chatelier (Quílez & Solaz, 1995).

Esta indiferenciación puede reforzarse en la enseñanza si los profesores no están atentos a los procedimientos llevados a cabo por los estudiantes. Por ejemplo, en el estudio llevado a cabo por Raviolo et al. (2004) se advirtió que estudiantes de primer año de universidad, al realizar planteos de preparación de disoluciones, escriben unidades de concentración en donde corresponde escribir unidades de cantidad de soluto. Si se les solicita que preparen 500 mL de una solución 1.0 M, escriben 1.0 M en 1000 mL y, por lo tanto, en 500 mL hay 0.50 M, cuando ambas soluciones son 1.0 M. El hecho de obtener el valor numérico correcto 0.50 refuerza esta confusión entre cantidad de sustancia y concentración.

Detrás de la resolución algorítmica de problemas de molaridad puede subyacer la inadecuada comprensión de los conceptos involucrados (Lutter y otros, 2019). Gabel et al. (1984) hallaron que estudiantes de secundaria, tanto los exitosos como los no exitosos, resolvían problemas usando técnicas algorítmicas y presentaban dificultades al responder preguntas sobre molaridad debido a falta de comprensión conceptual.

Algunas dificultades en la resolución de problemas pueden estar relacionadas con el establecimiento de relaciones de proporcionalidad entre las variables de molaridad. Por ejemplo, en el estudio de Anamuah-Mensah (1986), con estudiantes de nivel medio de grado 12, se identificaron dos estrategias al resolver problemas tradicionales de titulaciones ácido-base. Una estrategia basada en fórmulas y otra basada en proporcionalidad. La estrategia basada en fórmulas, como  $M = n/V$ , si bien no evidenciaba una comprensión cualitativa de los problemas y de las relaciones entre las variables, correspondió a la estrategia con el mayor porcentaje de respuestas correctas. Con la estrategia de proporcionalidad algunos estudiantes asumieron que existía una relación directamente proporcional entre la concentración y el volumen de la disolución, lo que trasluce la confusión entre  $n$  y  $M$ .

Las dificultades conceptuales pueden agravarse si la disolución sufre transformaciones como el agregado o evaporación de solvente. Por ejemplo, en la investigación sobre la resolución de problemas de química llevada adelante por Niaz (1995) con estudiantes universitarios se incluyeron dos problemas sobre concentraciones de disoluciones. En el primer problema, de tipo tradicional, los estudiantes debían calcular molaridad y molalidad partiendo de los datos de masa de soluto, volumen de disolución y densidad de la disolución. En el segundo problema los

estudiantes debían optar entre una o más afirmaciones correctas al responder sobre lo que le sucede a una disolución, de concentración molar y densidad conocidas, cuando se agrega un volumen de agua. El segundo problema, que es más conceptual y menos algorítmico que el primero, fue resuelto correctamente por pocos estudiantes, debido a que no asumían la constancia del número de moles de soluto. Resultados similares fueron encontrados por Heyworth (1999) al entrevistar a estudiantes de nivel medio grado 12.

Para Gabel y Samuel (1986) la dificultad radica en que los estudiantes no comprenden lo que ocurre con las variables de la concentración molar en procesos como dilución o evaporación. Al investigar las dificultades que presentan estudiantes de secundaria al resolver problemas de molaridad y problemas análogos basados en materiales cotidianos como limonada, estos autores hallaron que las dificultades encontradas en el test análogo son similares a las encontradas en el test químico, en situaciones donde se agregaba agua a la solución (dilución) o se evaporaba (aumento de la concentración). De acuerdo a estos resultados concluyeron que las dificultades van más allá de la no comprensión de términos como molaridad, moles o masa molar, dado que estos procesos de dilución, y aumento de la concentración por evaporación, no son entendidos en el ámbito cotidiano.

### ***Dificultades para establecer relaciones de proporcionalidad***

En el estudio que llevó adelante Stavy (1981), con alumnos menores de 14 años, se concluyó que la principal dificultad para comprender el concepto de concentración estaba conectada con la dificultad de comprender la proporcionalidad inversa. Es decir, para entender que con un incremento en la cantidad de solvente decrece la concentración de la disolución.

El tema de concentración de disoluciones fue elegido para ejemplificar situaciones en estudios sobre la proporcionalidad en educación matemática. En algunos de estos estudios, y de acuerdo a las edades de los estudiantes involucrados, la concentración es presentada con escalas cualitativas como: gusto más fuerte en una limonada (Cramer & Post, 1993), mayor dulzura en disoluciones de azúcar en agua (Hilton et al., 2013) o mayor gusto a naranja en disoluciones de jugo de naranja en polvo en agua (Park et al., 2010). Otros estudios educativos interdisciplinarios vincularon matemática y química, como el trabajo de Ramful & Narod (2014) que investigó el razonamiento proporcional en el tema estequiometría o el de Bakker et al. (2014) que analizaron la comprensión cuantitativa del proceso de dilución. Estas investigaciones resaltan la naturaleza situada de las abstracciones matemáticas en contextos específicos, como el químico, donde se aplica el razonamiento proporcional. Concluyeron que la complejidad para la comprensión de este tipo de procesos químicos se presenta en las unidades de concentración, dado que desde el punto de vista matemático se trata de operaciones simples de multiplicar y dividir.

En investigaciones de educación matemática sobre el razonamiento proporcional suelen identificarse tres tipos de tareas que incluyen proporciones (Cramer & Post, 1993): (a) problemas de comparación numérica, (b) problema del valor faltante (missing value) y (c) problemas de comparación o predicción cualitativa. En los problemas de comparación numérica se dan cuatro variables (a, b, c y d) y el objetivo es determinar la relación de orden (mayor, menor, igual) que hay en  $a/b$  y  $c/d$ . En los problemas del

valor faltante se proveen tres de los cuatro valores de la proporción  $a/b = c/d$  y se debe hallar el valor que falta. En los problemas de comparación cualitativa se lleva adelante comparaciones no dependientes de los valores numéricos específicos, incluso estos problemas pueden no incluirlos. A continuación (Tabla 1) ofrecemos ejemplos de esta clasificación que hemos elaborado aplicándolo al concepto de molaridad.

<p>(a) Problemas de comparación numérica: ¿Cuál de las siguientes disoluciones es más concentrada: (a) 0,20 moles soluto en 200,0 mL disolución o (b) 0,40 moles de soluto en 500,0 mL de disolución?</p> <p>(b) Problemas del valor faltante: ¿Cuántos moles de soluto hay en 200,0 mL de una disolución 0,500 M?</p> <p>(c) Problemas de comparación o predicción cualitativa: Se tienen dos disoluciones con la misma concentración molar ¿Cuál tiene mayor número de moles de soluto? (a) la que ocupa menor volumen o (b) la que ocupa mayor volumen.</p>
--

Tabla 1: Ejemplos de problemas de concentración molar clasificados de acuerdo a los tres tipos de tareas de proporcionalidad propuestas por Cramer & Post (1993).

Park et al. (2010) indican que son necesarios enfoques que vinculen razones con proporciones en situaciones específicas, profundizando en las conexiones matemáticas. Esto es extensible para el concepto de concentración, dado que la enseñanza frecuente de concentraciones de disoluciones hace hincapié en planteos con proporciones más que con razones. Los problemas habituales consisten en hallar el valor que falta, multiplicaciones cruzadas o de regla de tres. Se debería profundizar en el empleo de razones que hagan explícito que se trata de una cantidad de soluto por unidad volumen de disolución, es decir considerar la intensividad al razonar proporcionalmente.

Un aspecto central del razonamiento de proporcionalidad es que está inmerso en un contexto que supone simultáneamente covarianza de cantidades e invariancia de razones o productos (Lamon, 2007). La covarianza se refiere al cambio simultáneo en dos variables entre las que existe alguna relación que las vincula y la invariancia refiere a la constancia, en una o varias transformaciones, de la relación existente entre las dos variables. En el caso de la molaridad pueden variar proporcionalmente el número de moles y el volumen de disolución de forma tal de mantener constante la razón entre ambas variables o molaridad. Esto es clave para la comprensión profunda de concentración de disoluciones y para responder correctamente cuestiones conceptuales como las indagadas en esta investigación.

En la revisión bibliográfica llevada a cabo en los párrafos anteriores, se aprecia la falta de investigaciones que se focalicen en forma exclusiva en las dificultades que mantienen estudiantes universitarios sobre el concepto de molaridad. Este artículo pretende hacer una contribución que atienda a esta carencia, aportando una visión integradora entre los distintos enfoques (aprendizaje conceptual, resolución de problemas y desarrollo de razonamientos) en la discusión de los resultados obtenidos con los instrumentos empleados en esta investigación.

## Objetivo y pregunta de investigación

Esta investigación pretende indagar, en estudiantes que cursan el primer semestre de universidad, sobre la comprensión del concepto de concentración molar, luego de que este tema fuera enseñado y evaluado.

Este estudio intenta dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Qué dificultades poseen sobre las relaciones entre las variables del concepto molaridad ( $n$ ,  $V$  y  $M$ ) alumnos de primer año de universidad luego de la enseñanza del tema soluciones en general y concentración molar en particular?

## Metodología

El marco teórico, en el contexto de una investigación educativa cualitativa, orienta las preguntas de investigación, los métodos de recolección y análisis de los datos (Bodner y Orgill, 2007; Merriam, 2009). Esta investigación se enmarca en un enfoque constructivista por ser un marco teórico útil para una investigación que busca comprender la construcción del conocimiento, las concepciones alternativas y el cambio conceptual en el tiempo. En un estudio basado en una perspectiva constructivista la metodología de recolección de datos usada necesita ser diseñada para ayudar al investigador en la comprensión de los conceptos sostenidos por los participantes, donde interesa indagar cómo el conocimiento es construido activamente en la mente del que aprende cuando intenta dar sentido a la experiencia (Ferguson, 2007).

El diseño de estudio sigue la tradición de una investigación cualitativa interpretativa y descriptiva (Merriam et al., 2002), en la cual los datos son obtenidos de un cuestionario y de entrevistas. Para esto se diseñó un cuestionario, el cual se describe en el próximo apartado, que está orientado a obtener información sobre diferentes tipos de razonamiento conceptual y proporcional, de acuerdo a lo encontrado en la revisión bibliográfica y teniendo en cuenta la pregunta de investigación. Las entrevistas pensando en voz alta fueron conducidas con la intención de interpretar los resultados obtenidos en dicho cuestionario, dado que es una técnica adecuada para solicitar a los participantes que articulen y expliciten sus pensamientos mientras resuelven una tarea (Herrington y Daubenmire, 2014).

Sobre temas químicos afines al concepto de concentración, las entrevistas en voz alta han sido usadas para indagar, en alumnos de nivel medio, la resolución de problemas de moles, estequiometría, leyes de los gases y molaridad (Gabel y otros, 1984) y de análisis volumétrico (Anamuah-Mensah, 1986; Heyworth, 1999) y con alumnos universitarios, el concepto de mol (Staver y Lumpe, 1995). En las investigaciones revisadas no se encontró que se indague la forma en que estudiantes universitarios razonan sobre el concepto de concentración utilizando protocolos de pensamiento en voz alta.

## *Cuestionario Razonando con Molaridad (RWM)*

Para evitar las dificultades relacionadas con el empleo de representación submicroscópicas, el instrumento utilizado en esta investigación se apoya en las relaciones entre las variables macroscópicas involucradas en el concepto de molaridad.

La molaridad es un concepto que relaciona tres variables de la disolución: dos variables independientes extensivas  $n$  y  $V$ , y una variable dependiente intensiva  $M$ . Comprender el concepto de molaridad implicaría establecer las relaciones adecuadas



entre estas tres variables, que demandaría poner en juego razonamientos que involucran el control de variables y la proporcionalidad, en un contexto químico no familiar a los estudiantes.

El análisis lógico matemático de la ecuación  $M = n/V$  se plantea en el Cuadro 1.

$M.V = n$	$k =$ constante de proporcionalidad
Si $M$ es cte:	$V.k = n$ a mayor $V$ , mayor $n$ a menor $n$ , $V$ menor
Si $V$ es cte:	$M.k = n$ a mayor $M$ , mayor $n$ a menor $n$ , $M$ menor
Si $n$ es cte:	$M.V = k$ a mayor $M$ , menor $V$ a menor $V$ , $M$ mayor

Cuadro 1: Relaciones lógico matemáticas de las variables incluidas en la definición de molaridad.

Confeccionamos el cuestionario “Razonando con molaridad” RWM (Cuadro 2) para indagar sobre estas 6 relaciones matemáticas entre las variables de la concentración desde tareas de proporcionalidad de comparación cualitativa (Cramer & Post, 1993). Resultando un instrumento, cuya administración es de corta duración, que permite profundizar el estudio de la comprensión del concepto de concentración molar, sin las posibles interferencias de otros factores como las dificultades que presentan algunos estudiantes en la interpretación de los diagramas de partículas. Este cuestionario fue probado y discutido con una muestra piloto de 20 profesores que participaron en un curso sobre enseñanza de concentración de disoluciones realizado en una reunión nacional de enseñanza de la química. Este grupo de docentes concordó con el contenido y estructura del cuestionario y, como producto de la discusión realizada, se ajustaron los enunciados de los ítems del cuestionario mejorando su redacción.

El cuestionario evalúa si los estudiantes diferencian las variables involucradas en la definición de molaridad ( $n$ ,  $V$  y  $M$ ) y si establecen las relaciones de proporcionalidad directa e inversa entre ellas. Además, evalúa la comprensión del concepto de concentración molar en situaciones en las que una de las variables permanece constante y se deben comparar las otras dos. Determinar la relación que existe entre dos de las tres variables demanda razonamientos con proporcionalidad que incluyen simultáneamente covarianza e invariancia en una situación (Lamon, 2007). Si bien la unidad  $\text{mol.dm}^{-3}$  es la unidad propuesta por el SI, tanto los libros de texto y la enseñanza que recibieron estos estudiantes utilizó la unidad  $\text{mol.L}^{-1}$ .

<b>Razonando con molaridad</b>
1) ¿Cuál de las siguientes disoluciones 2,0 M tiene mayor número de moles de soluto? a. 300 mL b. 500 mL c. 100 mL
2) ¿Cuál de las siguientes disoluciones 1,5 M ocupa un volumen menor? a. tiene 0,10 moles de soluto b. tiene 0,50 moles de soluto c. tiene 0,25 moles de soluto

- 3) ¿Cuál de las siguientes disoluciones tiene mayor número de moles de soluto, si se cuenta con 800 mL de cada una?
- 0,10 M
  - 0,20 M
  - 0,40 M
- 4) ¿Cuál de las siguientes disoluciones tiene menor molaridad M, si se cuenta con 500 mL de cada una?
- tiene 1,0 moles de soluto
  - tiene 0,25 moles de soluto
  - tiene 0,50 moles de soluto
- 5) ¿Cuál de las siguientes disoluciones tiene mayor molaridad M, si en todas hay 0,10 moles de soluto?
- 100 mL
  - 300 mL
  - 500 mL
- 6) ¿Cuál de las siguientes disoluciones ocupa un volumen menor, si en todas hay 0,20 moles de soluto?
- 0,80 M
  - 1,0 M
  - 1,4 M

Cuadro 2: Traducción del Cuestionario Razonando con molaridad (RWM)

### ***Participantes***

El cuestionario fue contestado por 303 estudiantes de primer año de universidad, que cursaban la primera asignatura de química (Introducción a la Química o Química General), con una media de edad de 20,3 años, desviación estándar 3,2. Aunque el rango de edades va de 17 a 40, el 71% de los estudiantes tienen edades entre los 18 y 20 años. La muestra está formada por 176 mujeres y 127 varones. Estos estudiantes cursaban distintas carreras (Licenciatura en Biología, Licenciatura en Química, Ingeniería, Profesorado en Física y en Química) en 5 universidades nacionales argentinas: Comahue, Río Negro, Río Cuarto, Litoral y Tecnológica. Este estudio forma parte del proyecto de investigación 40-B-749 aprobado por la Universidad Nacional de Río Negro y los estudiantes fueron informados sobre los objetivos del mismo y accedieron voluntariamente a contestar el cuestionario.

Se trata de estudiantes ingresantes a la universidad, que habían cursado uno o dos años de química en la escuela secundaria, esto implica que al ingresar a la universidad, los estudiantes debían conocer lo concerniente al tema soluciones y algunos aspectos básicos de su tratamiento cuantitativo (Ministerio de Educación, 2011). En los meses previos, estos estudiantes habían asistido en la universidad a clases teóricas, de resolución de problemas, prácticas de laboratorio y a una evaluación que incluyó el tema concentración molar. Por cuestiones de acceso a los estudiantes, las entrevistas se llevaron a cabo con un subconjunto de la población que realizó el cuestionario, abarcando estudiantes de la localidad de los investigadores. Fueron entrevistados 18 estudiantes voluntarios de las universidades de Río Negro y Comahue de la ciudad de Bariloche.

### ***Procedimiento***

Se administró el cuestionario RWM (en idioma español) a mitad del semestre, luego que los estudiantes fueron evaluados sobre los temas cantidades químicas, estequiometría y disoluciones. Se administró en lápiz y papel, al finalizar una clase, a alumnos que aceptaron participar en la investigación.

Durante la administración de este instrumento se indica a los estudiantes que deben resolverlo mentalmente, sin calculadora y sin realizar cálculos en la hoja, de modo de no fomentar la resolución numérica del cuestionario. Con ello se dificulta la realización de cálculos mecánicos propiciando el pensamiento proporcional del tema a pesar de la existencia de valores numéricos de las variables. Lo que permite profundizar en el análisis de las causas de incomprensión conceptual (Lutter y otros, 2019). El tiempo promedio de contestación es aproximadamente 15 minutos.

La validez de contenido se basa en el hecho que el cuestionario abarca en forma exhaustiva las 6 relaciones lógico-matemáticas de las variables incluidas en la definición de molaridad. Se obtuvo un coeficiente de fiabilidad de Crombach (Crombach reliability coefficient) de 0,61, valor bajo (George y Mallery, 2003), aceptable para este estudio cuyo objetivo es indagar la comprensión de los estudiantes con un instrumento que da cuenta de la estructura lógicas-matemáticas entre las tres variables involucradas en el concepto molaridad. No se trata de una escala de actitudes sino de un test que constituye un constructo de medida de la comprensión de un concepto científico (Taber, 2018), orientado a indagar los razonamientos puestos en juego.

### ***Entrevistas pensando en voz alta***

Las entrevistas en voz alta (think-aloud method) son útiles para recolectar información acerca de los procesos cognitivos que una persona sigue durante la resolución de un problema (Ericsson y Simon, 1993). Además sirven cuando el investigador quiere conocer cómo y por qué un participante usa un conocimiento, proceso o algoritmo para resolver un problema o completar una tarea (Herrington y Daubenmire, 2014).

Las entrevistas pensando en voz alta se llevaron a cabo con la finalidad de indagar en los conocimientos, estrategias y razonamientos que emplearon los estudiantes al responder el cuestionario RWM. La literatura confirma el valor de los protocolos pensando en voz alta, como forma de explorar los procesos de pensamiento de los individuos, cuando la tarea ofrece un nivel efectivo de desafío cognitivo, como el que ofrece el cuestionario empleado en esta investigación, que permita una salida auténtica del discurso interno (Charters, 2003).

Participaron de estas entrevistas estudiantes de cada una de las dos asignaturas a las que se tuvo acceso, de ellos fueron seleccionados los 9 primeros estudiantes que aceptaron participar voluntariamente. Se realizaron a la semana posterior de la resolución del cuestionario. El cuestionario no había sido discutido con los estudiantes después de su administración. 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 8 minutos, fueron grabadas en audio y completamente transcritas. Los entrevistados leen en voz alta el problema, comentan cómo lo resolvieron y la respuesta a que arribaron. En muchos casos, este proceso de revisión y explicitación de lo hecho condujo a que corrijan la respuesta original que eligieron oportunamente en el cuestionario. El entrevistador no los interrumpe hasta que terminan de explicar un ítem e intentan pasar a otro, la retroalimentación (feedback) se produce solo para hacer conocer a los participantes que sus contribuciones son valiosas

y estimularlos a ampliar o confirmar una respuesta, si esto resulta necesario (Herrington y Daubenmire, 2014).

Al finalizar la entrevista, y en el caso de que no lo hubieran expresado al resolver el cuestionario, se les preguntó si recurrían a algún tipo de representación, si se imaginaban algo concreto distinto a cálculos en la resolución. El análisis de las transcripciones de las entrevistas fue realizado en forma independiente por cada uno de los tres 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

Para evaluar el cuestionario se asignó un punto a cada respuesta correcta y cero puntos a las respuestas incorrectas. En una escala que va de 0 a 6, el resultado promedio general fue de 4,1, desviación estándar 1,4. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2:

Ítem	1	2	3	4	5	6
<b>Opción a</b>	12	<b>207</b>	30	58	<b>212</b>	153
<b>Opción b</b>	<b>206</b>	75	9	<b>217</b>	9	22
<b>Opción c</b>	82	18	<b>264</b>	28	78	<b>126</b>
<b>No contesta</b>	3	3	0	0	4	2
<b>Total</b>	303	303	303	303	303	303

Tabla 2. Frecuencias de respuestas obtenidas en cada opción (N= 303). En negrita la respuesta correcta.

Los porcentajes de las opciones elegidas atendiendo a si se trató de la respuesta correcta, intermedia u opuesta, se muestran en la Tabla 3. Se considera respuesta opuesta cuando seleccionan la tendencia contraria, es decir la elección del menor valor cuando corresponde el mayor o viceversa:

Ítem	1	2	3	4	5	6
<b>Opción correcta</b>	68,0	68,3	87,1	71,6	70,0	41,6
<b>Opción opuesta</b>	27,1	24,8	9,9	19,1	25,7	50,5
<b>Opción intermedia</b>	4,0	5,9	3,0	9,2	3,0	7,3

Tabla 3. Porcentajes de respuestas correspondientes a las opciones ordenadas (N=303).

El 67,8% del total de las opciones elegidas por los estudiantes correspondió a la opción correcta, el 26,2% correspondió a la opción opuesta y solo un 5,4% a la intermedia. Esto permite aseverar que las opciones de este cuestionario no fueron elegidas al azar, sino

siguiendo algún tipo de razonamiento. Esta tendencia de polarización se profundiza si analizamos solamente los ítems con los resultados más bajos.

En los ítems 1 al 5 se aprecia que más de dos tercios de la muestra seleccionaron la respuesta correcta, hallándose dificultades particulares al responder el ítem 6 que implicaba razonamientos de proporcionalidad inversa. Solamente el 17,8% de los estudiantes contestaron bien a las seis preguntas del cuestionario y solamente 1 estudiante (0,3%) respondió en todos los casos con la opción opuesta. Dado que se trata de una variable cualitativa nominal: respuesta correcta o respuesta incorrecta, no admite mayor desarrollo de estadística descriptiva.

Por otra parte, el promedio obtenido por los 18 estudiantes entrevistados en el cuestionario fue de 4,4 (desviación estándar 1,0), similar al promedio de la muestra total. A continuación se presentan los resultados de las entrevistas, agrupados en categorías y ejemplificadas con citas representativas.

### ***Análisis de los resultados de las entrevistas***

Dado que los estudiantes están pensando sobre ejercicios puntuales, específicos, la amplitud de respuestas no fue muy grande y pudieron clasificarse en categorías hipotéticas, muchas de las cuales fueron reportadas en la revisión bibliográfica. Aunque la lectura independiente de cada uno de los investigadores estuvo atenta al surgimiento de nuevos hallazgos, el proceso inductivo de categorización de las respuestas estuvo influenciado por el conocimiento de las dificultades declaradas en otras investigaciones como: (a) la indiferenciación conceptual entre  $n$  y  $M$ , (b) la resolución algorítmica basada en números o (c) los inconvenientes para realizar razonamientos de proporcionalidad inversa.

Durante las entrevistas muchos estudiantes emitieron más de un tipo de razonamiento. Las categorías finales se presentan a continuación junto con algunas transcripciones seleccionadas por ser ejemplos representativos de dichas categorías. Estos resultados se discuten en los próximos apartados.

a) Respuestas correctas basadas en la proporcionalidad directa entre dos variables explicitando que una tercera permanece constante, acorde a los atributos de covarianza e invariancia de la proporcionalidad. Estos estudiantes pueden independizarse de los números y enunciar la relación de orden entre las dos variables (11 estudiantes, en los ítems 1-4 de proporcionalidad directa):

“En la misma cantidad de 800 mL, la mayor molaridad, o sea de molar, te da con mayor cantidad de moles.” (S9, ítem 3)

“Claro, si tenemos el mismo volumen, la de mayor cantidad de moles de soluto va a ser la más concentrada, porque justamente eso es lo que nos indica la molaridad” (S11, ítem 3)

Si bien, ningún entrevistado hizo referencia explícita a los términos intensivo o extensivo, algunos estudiantes se refirieron indirectamente a estas propiedades, mencionando que se trata de cantidad de soluto por unidad volumen de disolución, por cada litro de disolución:

“La concentración molar es la cantidad de moles por litro. Pienso que por litro son tanto...” (S10, ítem 4)

“Porque todas tienen la misma molaridad, sería la misma cantidad de moles por volumen, entonces la que tenga menos cantidad de moles tendría un volumen menor para que se cumpla la equivalencia.” (S14, ítem 2)

Otros explicitaron el concepto de proporción, sosteniendo que “se mantiene la proporción”:

“... a medida que aumente el volumen voy a tener mayor cantidad de soluto, porque la proporción sigue siendo la misma...” (S11, ítem 1)

“... yo lo miré también como proporción. El que tiene menor cantidad de moles tendría que tener menor volumen, porque es el mismo valor molar, no importa el valor”. (S18, ítem 2)

b) Respuestas correctas basadas en la proporcionalidad inversa entre dos variables explicitando que una tercera permanece constante, acorde a los atributos de covarianza e invariancia de la proporcionalidad. Estos estudiantes pueden independizarse de los números y enunciar la relación de orden entre las dos variables (11 alumnos, en los ítems 5 y 6 de proporcionalidad inversa):

“Claro, teniendo la misma cantidad de soluto en todas, en donde haya menos volumen va a estar más concentrado” (S11, ítem 5)

“En todas tengo el mismo número de moles, la c es la más concentrada, al ser la más concentrada tiene que tener menor volumen.” (S2, ítem 6)

c) Resolución numérica, explicitan que están buscando el valor faltante o uso de regla de tres. Comparan números y no emiten una generalización, no pueden independizarse de los números (9 alumnos):

“Hice los cálculos en mi mente. 2 M implica 2 moles en 1000 mL en 500 mL implica 1 mol... en 300 mL. Traté de comparar la mayor con la menor”. (S3, ítem 1)

“Hice la regla de tres simple, en mi cabeza... 1,5 moles hay en 1000 mL de solución entonces cuál es el más chico... y entonces haces la relación y eso te da el menor volumen... no hice las cuentas exactas pero te das cuenta...” (S1, ítem 2)

“2 M implica que hay dos moles en 1000 mL, en 500 mL tantos moles... dice cuál es el mayor... yo hice las cuentas... los resolví todos igual,” (S9, ítem 1)

d) Indiferenciación conceptual entre número de moles y concentración molar (9 alumnos):

“... ésta que tienen mayor número de moles va a tener menor volumen, porque esta cantidad de moles va a estar en menor volumen porque tienen igual concentración... mezclé número de moles con concentración, eso, porque yo lo que pensaba era el opuesto, a mayor cantidad de moles, tiene que ser menor volumen...” (S2, ítem 2)

“Entonces tenés 0,20 en 1000... Tenés 0,20 de concentración, 0,20 molar” (S4, ítem 6)

“En todas tenés 2 moles” (S17, ítem 1)

Algunos asocian que la disolución de mayor volumen tiene la mayor concentración (a número de moles constante):

“Tengo las tres disoluciones que tienen 0,10 moles de soluto, en la de 500 mL tengo mayor molaridad” (S7, ítem 5)

“Pero es más concentrado, el más concentrado ocupa más volumen” (S15, ítem 6)

Otros asignan a la disolución de menor volumen la menor concentración (a número de moles constante):

“Como en todas hay la misma cantidad de moles, el menor volumen va a ser ocupado también por el que tenga menor molaridad”. (S12, ítem 6)

De los 9 estudiantes que llevaron adelante una resolución numérica 6 evidenciaron también un indiferenciación conceptual entre  $n$  y  $M$ .

e) Razonamientos que se apoyan en algún tipo de representación concreta (7 alumnos). Las representaciones utilizadas fueron macroscópicas. Ningún entrevistado se basó espontáneamente en representaciones de partículas, por ejemplo en moléculas:

“Lo hice directamente razonando (sin cálculos)... me lo imaginé con pelotitas, entonces tengo lo mismo (volumen), en este tengo 10 pelotitas, en este 20 pelotitas y en este 40 pelotitas ... decidí que 0,40 M era más, es la que tiene mayor número de moles soluto” (S1, ítem 3)

“Me imagino un Erlenmeyer con agua y un líquido con color, mientras más clarito se vea más diluido” (S10, ítem 4)

La iniciativa de solicitar a los estudiantes al finalizar la entrevista, y en el caso de que no lo hubieran expresado durante la misma, que explicitaran si recurrían a algún tipo de imagen o representación interna, tuvo un carácter exploratorio, centrado en relevar el tipo de representación a la que recurrían o imaginaban durante la resolución del cuestionario, fundamentalmente si recurrían a representaciones con partículas. Específicamente, si en sus razonamientos relacionaban cuantitativamente número de partículas por unidad de volumen, en concordancia con las dificultades encontradas en estudios previos (Devetak et al., 2009 y de Berg, 2012).

Interesan especialmente las respuestas dadas en las entrevistas sobre el ítem 6 del cuestionario, donde se obtuvo una notable cantidad de respuestas incorrectas (58,4%). Para este ítem, cinco de los 18 entrevistados emitió una respuesta correcta basada en la proporcionalidad inversa entre las variables. Dentro de las respuestas incorrectas: 6 llevaron adelante una resolución numérica, 4 evidenciaron indiferenciación entre  $n$  y  $M$ , 3 explicitaron que a mayor volumen de disolución hay mayor concentración y uno que a menor volumen de disolución hay menor concentración. De los 6 entrevistados que llevaron adelante una resolución numérica, 4 presentaron confusiones entre  $n$  y  $M$ .

## Discusión

### *Indiferenciación conceptual*

Los resultados obtenidos en el cuestionario pueden ser explicados, en alguna medida, por la indiferenciación de los conceptos  $n$  y  $M$ . Como se evidencia en los ejemplos incluidos en el apartado anterior, en los ítems 1, 2, 5 y 6 invertir, en los enunciados del cuestionario, los conceptos  $n$  y  $M$  significó la elección de la respuesta opuesta, respuesta elegida, por aproximadamente el 26% en los ítems 1, 2 y 5 y por el 50,5 % en el ítem 6. Esto no ocurre en los ítems 3 y 4 dado que al ser a volumen constante la confusión entre  $n$  y  $M$  daría la misma respuesta. Por ejemplo en el ítem 6, si se “lee” cambiando  $n$  por  $M$ , “¿Cuál de las siguiente disoluciones ocupa un volumen menor si todas tiene 0,20 M?” se elegiría la de 0,80 moles (opción errónea elegida por el 50,5% de los estudiantes). Esta indiferenciación se observó en las entrevistas, en 9 de los 18 entrevistados, algunos de los cuales lo reconoció explícitamente, como S2: “mezclé número de moles con concentración”.

Para Novick & Menis (1976) la introducción de la molaridad aporta a la confusión de los estudiantes dado que se suma a los conceptos con similitudes fonéticas como mol, molécula, molecular y molar, que son introducidos en la enseñanza en un corto lapso de tiempo. La escritura de las unidades suele contribuir a esta confusión, por ejemplo algunos estudiantes suelen abreviar molaridad como “mol” (Heyworth, 1999). Además de esa similitud fonética entre moles y molaridad, existe una igualdad en el valor numérico: “1,20 M implica 1,20 moles en...” que contribuye significativamente a su indiferenciación conceptual (Raviolo et al., 2004).

Confusiones entre número de moles y molaridad fueron explícitamente mencionadas en las investigaciones de Dahsah & Coll (2008), Duncan & Johnstone (1973), Johnstone (1983) y Schmidt (1984). En otras investigaciones esta confusión no se manifestó porque las situaciones planteadas eran a volumen constante (a mayor  $n$ , mayor  $M$  o viceversa); por ejemplo, en el ítem evaluado por Calik (2005) o en el primer problema del estudio de Devetak et al. (2009). Como ya se mencionó, varios estudios mostraron como la no diferenciación entre cantidad de sustancia y concentración molar aparece en temas posteriores del currículo como titulaciones, pH y equilibrio químico.

Esta confusión entre  $M$  y  $n$  puede considerarse como un caso de indiferenciación conceptual, que Talanquer (2006) ha caracterizado como un razonamiento heurístico que les permite a los estudiantes simplificar el análisis de problemas o la interpretación de conceptos, reduciendo los factores a ser considerados. Es una forma ingenua de pensar que subyace en muchas concepciones alternativas. En general, las personas tienden, al tomar decisiones, a reducir el número de factores que analizan focalizando en una variable y descuidando otras (Talanquer, 2014). Una forma de reducción donde se utiliza indistintamente dos conceptos diferentes, sin tener en cuenta aspectos o condiciones importantes de sus definiciones.

En las entrevistas se halló que algunos estudiantes aluden a representaciones al responder a las cuestiones y que dichas representaciones son macroscópicas, relacionadas con la densidad, intensidad del color de la disolución y número de bolitas en un volumen. No acuden espontáneamente a representaciones submicroscópicas como moléculas, lo que resalta la importancia de que la interpretación de los fenómenos químicos no quede reducida solo al nivel de representación submicroscópico (Talanquer, 2011) y se discutan las relaciones entre las variables macroscópicas.

### ***Razonamiento de proporcionalidad***

Dificultades en la comprensión del concepto de concentración fueron atribuidas a ineficientes razonamientos de proporcionalidad básica (Adadan & Savasci, 2012; Devetak et al., 2009) o a la incapacidad de discernir si se trata de una proporcionalidad directa o una inversa (Anamuah-Mensah, 1986). Para Ryan (2012) las dificultades de alumnos que ingresan a la universidad no se deben a falencias en razonamiento proporcional sino a falta de conocimiento sobre cómo aplicarlo en química y en particular a las disoluciones.

En las entrevistas la mitad de los estudiantes llevaron adelante una resolución numérica de algún ítem del cuestionario. Explícitamente compararon números buscando el valor faltante, sin emitir una generalización de las relaciones entre las variables involucradas. Por otro lado, dos tercios de los estudiantes aplicaron, por lo menos en algún ítem, razonamientos de proporcionalidad directa e inversa entre dos variables



admitiendo a una tercera constante. En esos casos pudieron independizarse de los números y enunciar relaciones de orden entre dos variables; relaciones del tipo: a mayor volumen de disolución mayor número de moles a concentración constante, evidenciando la incorporación de los atributos de covarianza e invariancia de la proporcionalidad (Lamon, 1993).

En concordancia con los resultados obtenidos por Stavy (1981), la principal confusión se presentó en el ítem 6, correspondiente a un razonamiento de proporcionalidad inversa: a número de moles constante, la disolución de mayor concentración ocupará un volumen menor. Para Stavy & Tirosh (1996) las respuestas de los estudiantes ante situaciones de comparación, en distintos contextos de contenido y demanda de razonamientos, se rigen por un número reducido de reglas intuitivas, entre ellas: “cuanto más A, más B”. En los ítem 1, 2, 3 y 4, aplicar esta regla conduce a la respuesta correcta, en cambio, en los ítems 5 y 6 conduce a la respuesta opuesta e incorrecta “la disolución más concentrada ocupa más volumen” (a igual número de moles de soluto). Esta tendencia a la generalización se ve reforzada por experiencias aparentemente similares en contextos cotidianos y educativos, y se considera que es un razonamiento intuitivo porque a los sujetos les parece evidente y les aporta seguridad. Si bien esta regla es frecuente en niños, no se abandona con la edad y puede resurgir en contextos desconocidos para el sujeto, como el de la química.

Como fue generalizado para la educación matemática, la enseñanza frecuente de concentraciones de disoluciones hace hincapié en planteos con proporciones (hallar el valor que falta, multiplicaciones cruzadas o de regla de tres) más que con razones (Park et al., 2010). Para el concepto de concentración, se debería profundizar en el empleo de razones que hagan explícito que se trata de una cantidad de soluto por unidad volumen de disolución, es decir considerar la intensividad al razonar proporcionalmente.

### ***Visión integradora de enfoques***

La comprensión conceptual profunda de molaridad implicaría el conocimiento e integración de los siguientes aspectos: (a) identificar y diferenciar las variables involucradas en la definición de molaridad ( $n$ ,  $V$  y  $M$ ), (b) reconocer la naturaleza de estas variables (extensivas:  $n$  y  $V$ ; intensivas;  $M$ ) y (c) establecer las relaciones entre ellas (de proporcionalidad directa y de proporcionalidad inversa).

El bajo número de respuestas correctas en el ítem 6, comparado con los otros, puede ser explicado por la complejidad de tarea asociada con el tipo de variable que tienen que relacionar, si se trata de propiedades extensivas o intensivas. La notable diferencia, estadísticamente significativa ( $t = 7,33$ ,  $p < 0,01$ ), obtenida entre los dos ítems que requerían razonamientos de proporcionalidad inversa, ítem 5 (70%) e ítem 6 (41,6%), se debe al hecho de que en el ítem 5 el sujeto considera, o visualiza, el número de moles en distintos volúmenes y arriba a la respuesta correcta, que a menor volumen mayor concentración. En cambio en el ítem 6, debe considerar el número de moles en distintas concentraciones, es decir la relación entre  $n$  y  $n/V$  y arribar a la conclusión de que a mayor concentración menor volumen. En el ítem 5 se compara 0,10 moles en 100 mL, 0,10 moles en 300 mL, 0,10 moles en 500mL, y se arriba a una relación de proporcionalidad inversa a partir de dos variables extensivas; en cambio, en el ítem 6 se debe arribar a esta relación de proporcionalidad inversa a partir de una variable extensiva y una variable intensiva (una razón). Esto genera una mayor carga cognitiva,

por tener que procesar en la memoria de trabajo mayor número de variables al mismo tiempo, y una visible perturbación en los estudiantes cuando se enfrentan a este ítem del cuestionario. La complejidad del contenido a ser aprendido puede producir una sobrecarga cognitiva debido a que el procesamiento de la información y la construcción del conocimiento están pautados por las limitaciones en la capacidad de la memoria de trabajo (Sweller, 1994).

La consideración de la naturaleza intensiva de la concentración se discutió en la investigación de Ryan (2012), donde las dificultades surgieron en tareas que presentaban a los estudiantes disoluciones de diferentes volúmenes con la misma molaridad. Para muchos estudiantes estos recipientes tenían igual cantidad de soluto. Al no razonar en términos intensivos, igual molaridad implicaba para ellos igual cantidad de soluto. Algunos estudiantes, que razonaron en términos extensivos, explícitamente mencionaron que “M es moles”, confundiendo concentración con cantidad de soluto. Se concluyó que, para este tipo de tareas simples, los estudiantes que ingresan a la universidad disponen de habilidades de razonamiento proporcional, pero no lo transfieren correctamente a tareas que involucran disoluciones. Para estos alumnos, la habilidad de razonar proporcionalmente se apoya en el uso de un conjunto relativamente simple de explicaciones como el esquema de razonamiento extensivo, con cierta falta de rigor matemático, al no considerar a las propiedades intensivas como constantes de proporcionalidad (Wink y Ryan, 2019).

Para Stavy y Tirosh (1996), los niños (6 a 10 años), al no contar con el concepto de propiedad intensiva, se dejan influir por los aspectos perceptibles de la cantidad total de disolución y aplican razonamientos del tipo “más de A, más de B”. Esto se observó también en el trabajo de Fassoulopoulos y otros (2003) que investigaron las ideas de estudiantes griegos (12 y 15 años) sobre la densidad. Un 25% sostuvo una visión extensiva de la densidad que “la densidad es mayor en el vaso que contienen más agua”. Observaron que la mayoría de los alumnos que conciben a la densidad como propiedad intensiva, es decir independiente de la cantidad, lo hacen porque perciben a la densidad como dependiente del tipo de material más que por un razonamiento de proporcionalidad que relacione las variables masa y volumen. Los estudiantes que tienen una visión extensiva tienden a reducir las dos variables (la intensiva y la extensiva) en una, de acuerdo a las características perceptuales de la tarea. Tal como señaló Johnstone (1983) el problema de que las sustancias se encuentren en disolución, dificulta la comprensión de estudiantes de nivel medio de aspectos relacionados con la estequiometría, al adicionar el problema de la diferenciación entre propiedades extensivas e intensivas.

En el caso del aprendizaje de la concentración, y como ocurre en la resolución de problemas de otros temas, muchas de las dificultades encontradas pueden ser atribuidas al uso de algoritmos con poca comprensión de los conceptos subyacentes y de las relaciones entre ellos (Dahsah & Coll, 2008). Un problema algorítmico es aquel que se puede resolver utilizando un conjunto de procedimientos memorizados; en cambio, un problema conceptual requiere que el estudiante trabaje desde la comprensión de un concepto hasta la solución del problema (Cracolice, et al. 2008). Para estos autores, el hecho de que la mayoría de los estudiantes en los cursos de química de la escuela secundaria y la universidad se basen casi exclusivamente en un enfoque algorítmico es contraproducente para las necesidades a largo plazo de los estudiantes de sus cursos de

química porque la memorización de un algoritmo no produce el desarrollo de habilidades cognitivas, como las utilizadas en razonamientos científicos.

El hecho de que el cuestionario RWM se debía resolver mentalmente, sin calculadora y cuentas en la hoja, no fomentó la resolución algorítmica del cuestionario, aunque la mitad de los entrevistados no pudo en sus razonamientos independizarse de los números y emitir generalizaciones sobre las relaciones entre las variables del concepto de molaridad. La resolución algorítmica a la que recurrieron estos alumnos consistió en la introducción de números en una fórmula o hallar el valor faltante en la ecuación  $a/b = c/d$ .

La resolución algorítmica basada fórmulas, enfoque que promueve la mayoría de los libros de texto, y la resolución numérica mecánica, pueden ocultar dificultades subyacentes en la comprensión de los tres aspectos conceptuales mencionados de la molaridad. Por ejemplo, en la investigación llevada a cabo por Anamuah-Mensah (1986) se observó que muchos alumnos que intentaron resolver problemas tradicionales de titulación en forma cualitativa, sin utilizar en forma mecánica fórmulas, asumieron una relación directamente proporcional entre la concentración y el volumen de la disolución, evidenciando un desconocimiento de las relaciones adecuadas entre las variables. En las entrevistas se halló que de los 9 estudiantes que llevaron adelante una resolución numérica 6 evidenciaron también un indiferenciación conceptual entre  $n$  y  $M$ .

Saber calcular concentraciones constituye un conocimiento procedimental que puede ser aprendido de forma memorística (Lutter et al., 2019). Esto se ve reforzado por la presentación que hacen los libros de texto de química universitarios de uso más frecuente, que presentan a las concentraciones con fórmulas (de las cuales hay que despejar una incógnita), y en particular a la molaridad como un factor de conversión entre moles de soluto y volumen de disolución. Cramer y Post (1993) admiten que en los problemas del tipo comparación numérica y valor faltante los estudiantes pueden usar rutinas memorizadas para resolverlos, y que los problemas de comparación cualitativa (razonamiento solicitado en el cuestionario RWM) son más conceptuales porque requieren la comprensión del significado de una proporción. Afirman que este pensamiento cualitativo permite establecer los parámetros apropiados de la situación problema y chequear la viabilidad de las respuestas, siendo necesarios antes de realizar cálculos.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos en el cuestionario y en las entrevistas se desprende que aproximadamente la mitad de los estudiantes de primer año de universidad no lograron un conocimiento conceptual profundo de la molaridad, dado que presentan dificultades en uno o varios de los siguientes aspectos previamente destacados: (a) identificar y diferenciar las variables involucradas en la definición de molaridad ( $n$ ,  $V$  y  $M$ ), (b) reconocer la naturaleza de estas variables (extensivas:  $n$  y  $V$ ; intensivas;  $M$ ) y (c) establecer las relaciones entre ellas (de proporcionalidad directa y de proporcionalidad inversa).

El dominio del concepto de concentración implicaría una comprensión sólida que le permita al estudiante resolver cualquier situación que involucre al concepto independientemente de la complejidad de la misma. Esto supone entender la naturaleza de las disoluciones y de las variables involucradas, reconocer a la concentración como

una variable intensiva que relaciona dos variables extensivas, y llevar adelante razonamientos de proporcionalidad directa e inversa manteniendo una de las tres variables constante.

Si bien la principal confusión se presentó en un ítem de proporcionalidad inversa, donde respuestas intuitivas del tipo “a más X más Y” no son válidas, comprender y aplicar el concepto de concentración en este caso va más allá del dominio de este razonamiento como se evidenció en los resultados obtenidos en el ítem 6. Verificamos que la dificultad yace en la complejidad de la tarea relacionada con el tipo de variables que tienen que relacionar. Les resulta notablemente más difícil aplicar la proporcionalidad inversa en el caso en que se deben relacionar cualitativamente número de moles (extensiva) y  $M$  (intensiva) para determinar qué disolución ocupa un menor volumen, que cuando tienen que relacionar las dos variables extensivas entre sí (ítem 5).

Comprender y aplicar el concepto de concentración molar requiere que el estudiante disponga de un conocimiento sobre la naturaleza de las variables involucradas y su comportamiento en distintas situaciones. Muchos estudiantes ante situaciones que les resultan complejas, por el tipo de razonamiento que implican o, fundamentalmente, por el número de variables que deben manipular simultáneamente para resolverlas, recurren a una indiferenciación conceptual, es decir a simplificar el número de variables asumiendo distintas variables como iguales. En particular, asumen como iguales a cantidad de soluto y concentración, considerando a la concentración como una variable extensiva.

La resolución de problemas de concentración basada en el uso mecánico de procedimientos algorítmicos, impide que los estudiantes puedan despegarse de los números y abstraer las relaciones cualitativas-conceptuales entre las variables involucradas y operar eficientemente con ellas. En la enseñanza tradicional de disoluciones, los estudiantes generalmente no han sido enfrentados a cuestiones conceptuales sobre la concentración, como las presentadas en el cuestionario RWM. En las entrevistas se observó que con el solo hecho de razonar en voz alta los estudiantes se daban cuenta de sus errores y corregían las respuestas marcadas inicialmente en el cuestionario.

Con respecto a indagar las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje del concepto de concentración, la investigación llevada a cabo tiene la limitación de abordar el caso particular de la concentración molar, que requiere el conocimiento de la magnitud cantidad de sustancia y su unidad mol, sobre el cual, y como fuera expuesto al comienzo, los estudiantes presentan muchas dificultades en su aprendizaje. Como proyección de esta investigación se pretende dar continuidad aplicando un cuestionario análogo al RWM pero con magnitudes familiares, para estudiantes argentinos, como gramos de soluto por litro de disolución; y de esta forma profundizar en el aprendizaje del concepto de concentración sin tratar con unidades como molaridad y molalidad que incluyen al elusivo (Nelson, 1991) concepto mol. Por otro lado, el estudio de las imágenes o representaciones internas a las que acuden los estudiantes al razonar con el concepto de concentración, tuvo un carácter exploratorio y preliminar. Este aspecto también se pretende profundizar en otra etapa de investigación.

Como implicaciones para la enseñanza se sugiere presentar a los estudiantes tareas donde se apliquen razonamientos de proporcionalidad orientadas a la predicción y comparación cualitativa, como las abordadas en este estudio. Durante este tipo de tareas

Raviolo, A., Farré, A., Traiman Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education: Research and Practice*, 22(2), 486-497.  
Royal of Chemical Society. DOI: 10.1039/d0rp00344a  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/rp/d0rp00344a>

es conveniente estimular a que los estudiantes expliciten el hecho de que están analizando la relación que existe entre dos variables dejando una tercera constante. La discusión en clase, o en grupos pequeños, de las respuestas brindadas en forma individual en el cuestionario puede constituir una estrategia útil.

La comprensión conceptual química y el razonamiento proporcional matemático tienen que complementarse y retroalimentarse simultáneamente. Generalmente los estudiantes no presentan falencias en el razonamiento proporcional sino en cómo aplicarlo en química. Se aprende en profundidad el concepto molaridad poniendo en juego todas las relaciones matemáticas que se establecen entre las variables involucradas y, con ese trabajo, se favorece la transferencia del concepto de proporcionalidad, y sus atributos de covarianza e invariabilidad, al aplicarlo a otras áreas como la química.

### Referencias bibliográficas

- Adadan, E. & Savasci, F. (2012). An analysis of 16–17-year-old students' understanding of solution chemistry concepts using a two-tier diagnostic instrument. *International Journal of Science Education*, 34(4), 513-544.
- Andersson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, 53-85.
- Anamuah-Mensah, J. (1986). Cognitive strategies used by chemistry students to solve volumetric analysis problems. *Journal of Research in Science Teaching*, 23, 759–769.
- Bakker, A., Groenveld, D., Wijers, M., Akkerman, S., & Gravemeijer, K. (2014). Proportional reasoning in the laboratory: An intervention study in vocational education. *Educational Studies in Mathematics*, 86(2), 211-221.
- Bergquist, W. & Heikkinen, H. (1990). Student ideas regarding chemical equilibrium. *Journal of Chemical Education*, 67(12), 1000-1003.
- Bodner, G. & Orgill, M. (2007). *Theoretical frameworks for research in chemistry and science education*. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall.
- Calik, M. (2005). A cross-age study of different perspectives in solution chemistry from junior to senior high school. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 3(4), 671–696.
- Calik, M., Ayas, A., & Ebenezer, J. (2005). A review of solution chemistry studies: Insights into students' conceptions. *Journal of Science Education and Technology*, 14(1), 29-50.
- Calik, M., Ayas, A., & Coll, R. (2010). Investigating the effectiveness of teaching methods based on a four-step constructivist strategy. *Journal of Science Education and Technology*, 19(1), 32–48.
- Charters, E. (2003). The use of think-aloud methods in qualitative research. An introduction to think- aloud methods. *Brock Education Journal*, 12(2), 68-82.
- Cracolice, M., Deming, J., & Ehlert, B. (2008). Concept learning versus problem solving: a cognitive difference. *Journal of Chemistry Education*, 85(6), 873-878.
- Cramer, K., & Post, T. (1993). Proportional reasoning. *Mathematics Teacher*, 86(5), 404-407.

Raviolo, A., Farré, A., Traiman Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education: Research and Practice*, 22(2), 486-497.  
Royal of Chemical Society. DOI: 10.1039/d0rp00344a  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/rp/d0rp00344a>

- de Berg, K. (2012). A study of first-year chemistry students' understanding of solution concentration at the tertiary level. *Chemistry Education Research and Practice*, 13, 8-16.
- Dahsah, C., & Coll, R. (2008). Thai grade 10 and 11 students' understanding of stoichiometry and related concepts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 6, 573-600.
- Devetak, I., Vogrinc, J., & Glažar, S. (2009). Assessing 16-year-old students' understanding of aqueous solution at submicroscopic level. *Research Science Education*, 39(2), 157-179.
- Dierks, W. (1981). Teaching the mole. *European Journal of Science Education*, 3(2), 145-158.
- Duncan, I., & Johnstone, A. (1973). The mole concept. *Education in Chemistry*, 10(6), 213-214.
- Dunnivant, F. M., Simon, D. M., & Willson, S. (2002). The making of a solution: A simple but poorly understood concept in general chemistry. *The Chemical Educator*, 7(4), 207-210.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1993). Protocol analysis: verbal reports as data, Cambridge, MA: MIT Press.
- Fang, S. C., Hart, C., & Clarke, D. (2014). Unpacking the meaning of the mole concept for secondary school teachers and students. *Journal of Chemical Education*, 91(3), 351-356.
- Fassouloupoulos, G., Kariotoglou, P. y Koumaras, P. (2003). Consistent and inconsistent pupils' reasoning about intensive quantities: the case of density and pressure. *Research in Science Education*, 33, 71-87.
- Ferguson, R. L. (2007). Constructivism and social constructivism. In Bodner, G. M. y Orgill, M. *Theoretical frameworks for research in Chemistry and Science Education* (pp. 27-47). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Frazer, M., & Servant, D. (1986). Aspects of stoichiometry-titration calculations. *Education in Chemistry*, 23(2), 54-56.
- Gabel, D., Sherwood, R., & Enochs, L. (1984). Problem-solving skills of high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, 21(2), 221-233.
- Gabel, D., & Samuel, K. (1986). High school students' ability to solve molarity problems and their analog counterparts. *Journal of Research in Science Teaching*, 23(2), 165-176.
- Gabel, D. & Bunce, D. (1994). Research on problems solving: chemistry. In Gabel D.L. (ed), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. New York: Macmillan, 301-326.
- George, D. & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference 11.0 update* (4th ed.). Boston: Allyn & Bacon.
- Herrington, D. G. & Daubenmire, P. L. (2014). Using interviews in CER projects: options, considerations, and limitations. In D. M. Bunce & R. S. Cole. *Tools of Chemistry Education Research* (pp. 31-59), ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society.
- Heyworth, R. (1999). Procedural and conceptual knowledge of expert and novice students for the solving of a basic problem in chemistry. *International Journal of Science Education*, 21(2), 195-211.

Raviolo, A., Farré, A., Traiman Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education: Research and Practice*, 22(2), 486-497.  
Royal of Chemical Society. DOI: 10.1039/d0rp00344a  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/rp/d0rp00344a>

- Hilton, A., Hilton, G., Dole, S. & Goos, M. (2013). Development and application of a two-tier diagnostic instrument to assess middle-years students' proportional reasoning. *Mathematics Education Research Journal*, 25(4), 523-545.
- Johnstone, A. H. (1983). Chemical education research: Facts, findings, and consequences. *Journal of Chemical Education*, 60(11), 968-971.
- Khang, G., & Sai, C. (2008). Secondary school students' difficulties in learning the "mole concept"- A preliminary study in Singapore. *Singapore Journal of Education*, 8(1), 80-88.
- Krishnan, S. R., & Howe, A. C. (1994). The mole concept developing an instrument to assess conceptual understanding. *Journal of Chemical Education*, 71(8), 653-655.
- Lamon, S. J. (1993). Ratio and proportion: connecting content and children's thinking. *Journal for Research in Mathematics Education*, 24(1), 41-61.
- Lamon, S. J. (2007). Rational numbers and proportional reasoning: towards a theoretical framework for research. In F. K. Lester (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning: a project of the National Council of Teachers of Mathematics* (pp. 629-667). Charlotte: Information Age Publishing.
- Lutter, J., Hale, L., & Shultz, G. (2019). Unpacking graduate student's knowledge for teaching solution chemistry concepts. *Chemistry Education Research and Practice*, 20, 258-269.
- Merriam, S. B. (Ed.). (2002). *Qualitative research in practice*. San Francisco, CA: Wiley.
- Merriam, S. B. (2009). *Qualitative research: a guide to design an implementation*. San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- Ministerio de Educación (2011). *Núcleos de Aprendizaje Prioritarios. Ciencias Naturales*. Buenos Aires.
- Nelson, P. G. (1991) The elusive mole. *Education in Chemistry*, 28, 103-104.
- Niaz, M. (1995). Progressive transitions from algorithmic to conceptual understanding in student ability to solve chemistry problems: A Lakotian interpretation. *Science Education*, 79, 19-36.
- Novik, S., & Menis, J. (1976). A study of student perceptions of the mole concept. *Journal of Chemical Education*, 53(11), 720-722.
- Nurrenbern, S., & Pickering, M. (1987). Concept learning versus problem solving: is there a difference? *Journal of Chemical Education*, 64(6), 508-510.
- Park, J. S., Park, J. H., & Kwon, O. N. (2010). Characterizing the proportional reasoning of middle school students. *Seoul National University Journal of Education Research*, 19(5), 119-144.
- Pinarbasi, T. & Canpolat, N. (2003). Students' understanding of solution chemistry concepts. *Journal of Chemical Education*, 80(11), 1328-1332.
- Quílez, J. & Solaz, J. J. (1995). Students' and teachers' misapplication of Le Chatelier's principle: implications for teaching of chemical equilibrium. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(9), 939-957.
- Ramful, A., & Narod, F. (2014). Proportional reasoning in the learning of chemistry: levels of complexity. *Mathematics Education Research Journal*, 26, 25-46.
- Raviolo, A., Siracusa, P., Gennari, F., & Corso, H. (2004). Utilización de un modelo analógico para facilitar la comprensión del proceso de preparación de

Raviolo, A., Farré, A., Traiman Schroh, N. (2021). Students' understanding of molar concentration. *Chemistry Education: Research and Practice*, 22(2), 486-497.  
Royal of Chemical Society. DOI: 10.1039/d0rp00344a  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/rp/d0rp00344a>

- disoluciones [Use of an analog model to facilitate the understanding of the preparation process of dissolutions]. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(3), 379-388.
- Ryan, S. A. (2012). *Student ratio use and understanding of molarity concepts within solutions chemistry*. Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, Chicago.
- Schmidt, H. (1984). How pupils think: empirical studies on pupils' understanding of simple quantitative relationships in chemistry. *School Science Review*, 66, 156–162.
- Smith, K., & Metz, P. (1996). Evaluating student understanding of solution chemistry through microscopic representations. *Journal of Chemical Education*, 73(3), 233-235.
- Staver, J. R., & Lumpe, A. T. (1995). Two investigations of students' understanding of the mole concept and its use in problems solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(2), 177-193.
- Stavy, R. (1981). Teaching inverse functions via the concentrations of salt water solution. *Archives de Psychologie*, 49, 267-287.
- Stavy, R., & Tirosh, D. (1996). Intuitive rules in science and mathematics: the case of "more of A-more of B". *International Journal of Science Education*, 18(6), 653-667.
- Strömdahl, H., Tullberg, A., & Lybeck, L. (1994). The qualitatively different conceptions of 1 mol. *International Journal of Science Education*, 16(1), 17-26.
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning Instructional*, 4, 295-312.
- Taber, K. (2018). The use of Crombach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, 48, 1273-1296.
- Talanquer, V. (2006). Commonsense chemistry: a model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811-816.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Talanquer, V. (2014). Chemistry education: ten heuristics to tame. *Journal of Chemical Education*, 91, 1091-1097.
- Vincent, A. (1981). Volumetric concepts – student difficulties. *Education in Chemistry*, 18(4), 114-115.
- Wink, D. J. & Ryan, S. A. (2019). 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.