



Dificultades en el razonamiento causal y en los conceptos utilizados para explicar el efecto Mpemba

Difficulties in causal reasoning and in the concepts used to explain the Mpemba effect

Nidia Yaneth Torres Merchan¹, Jordi Solbes², Camilo Arturo Suarez Ballesteros¹ y José Luis Casas Hinestroza¹

Resumen

Este estudio identifica los conceptos que los estudiantes utilizan para explicar el efecto Mpemba y se describen sus dificultades para explicarlo causalmente. Para ello se desarrolló una experiencia de clase que consistió en observar un vídeo del fenómeno elaborado por los autores y se desarrolló un cuestionario. La experiencia se desarrolló en tres momentos, y cuestiona sobre cómo y por qué sucede el fenómeno a nivel molecular. Participaron 37 estudiantes de 8^o semestre de la Licenciatura en Ciencias Naturales de una universidad colombiana. Se observó que los estudiantes asocian sus contestaciones a conceptos de flujo de calor, cinética molecular y cambio de estado del material que se aluden a causas. Dentro de las dificultades sobresalen la limitación para describir el fenómeno temporalmente, de manera que se haga evidente las actividades de las entidades y su organización.

Palabras clave

Mpemba; educación en ciencias, razonamiento mecanicista causal.

Abstract

This study identifies the concepts that students use to explain the Mpemba effect and describes their difficulties in explaining it causally. For this, a class experience consisting of a video of the phenomenon was developed with questions, divided into three moments, about how and why the phenomenon occurs at the molecular level. 37 students from the 8th semester of the Natural Sciences Degree from a Colombian university participated. It was observed that the students associate their answers to concepts of heat flow, molecular kinetics and change of state of the material that are alluded to with causes. Among the difficulties, the limitation to describe the phenomenon temporarily stands out, so that the activities of the entities and their organization become evident.

Keywords

Mpemba effect; science education, mechanistic causal reasoning.

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.

² Universitat de València, España.

Introducción

El término mecanismo causal se utiliza en diferentes disciplinas, donde se hace uso rutinario de estos conceptos, pero en cada una ha sido abordado de manera diferente. En el caso de la Física, el término mecanismo (o mecanicismo) se introduce en el siglo XVII e implica que todo cambio puede reducirse a movimientos mecánicos de las partículas que constituyen la materia. Contribuyó positivamente a la termodinámica, al relacionar el calor con el movimiento de las partículas de los cuerpos y a la química, al apoyar el atomismo. En óptica apoyó el modelo corpuscular frente al ondulatorio; en electromagnetismo, favoreció la utilización de fuerzas a distancia. Sin embargo, el determinismo subyacente en el mecanicismo ha sido puesto en cuestión en el siglo XIX por la Teoría Cinética y la Mecánica estadística y, a principios del siglo XX, con mayor rotundidad, por la Física cuántica, en las que prevalece un razonamiento probabilista (Solbes & Tarín, 2008; Torres et al., 2022).

En el caso de los mecanismos biológicos, estos son producidos por la evolución y pueden responder a bucles de retroalimentación y ciclos internos, o estar acoplados a otros mecanismos, generando dinámicas complejas (Craver, 2001). La complejidad de los fenómenos biológicos hace que se utilice la noción de mecanismo, derivada de las teorías causales de procesos. Esta noción pretende capturar la idea de que los fenómenos biológicos son producidos por un conjunto de entidades y actividades que interaccionan de forma organizada y no reducible a sus componentes (Craver & Tabery, 2017).

Glennan (2005) ha estudiado el papel del mecanismo causal en la investigación científica y se ha enfocado en identificar el razonamiento mecanicista en el pensamiento de los estudiantes. Los mecanismos causales permiten comprender cómo ocurren las cosas, por lo cual es importante abordarlos en las clases de ciencias, dado que nos ayuda a explicar fenómenos naturales, utilizando relaciones causales (Clement & Yanowitz, 2003). Otros (Schauble, 1996; Koslowski, 1997) afirman que el razonamiento científico consiste en posibilitar el uso de mecanismos causales donde se explique el proceso por el que una causa produce un efecto. Metz (1991), hace énfasis en potenciar estrategias para que los estudiantes representen cómo se producen los cambios en un sistema. De este modo, lo que busca una explicación mecanicista es entender de forma adecuada y completa el fenómeno y no se reduce a describirlo o predecirlo (Craver, 2001).

El razonamiento mecanicista implica explicar qué acontecimientos siguen a los demás y por qué lo hacen (Glennan 2005). Este tipo de explicaciones son las que pretendemos que los estudiantes manifiesten cuando analicen el efecto Mpemba, donde llevamos a los estudiantes a pensar no solo en el *porqué*, sino en el *cómo* sucede un fenómeno.

En el campo de la educación científica, Russ et al. (2008) utiliza el análisis del discurso para reconocer el razonamiento mecanicista y en su estudio adaptan descripciones de mecanismos desde la filosofía de la ciencia (Machamer *et al.*, 2000) y hacen énfasis en aspectos como describir el objetivo del fenómeno, identificar condiciones de configuración, entidades, actividades, propiedades y organización de entidades. Esta autora indica que, si bien ha habido una gran cantidad de atención a los orígenes, la naturaleza y la importancia del razonamiento mecanicista, no se ha suministrado una precisa definición de razonamiento mecanicista, para apoyar el análisis del discurso de los estudiantes, y se mantiene la noción desde la causalidad, por lo cual sugieren que los maestros efectúen un seguimiento de las explicaciones de los estudiantes en las clases de ciencias. En un estudio más reciente,

Moreira et al. (2019) caracterizan diferentes tipos de razonamiento manifestados por estudiantes de química de la escuela secundaria al construir explicaciones escritas de un fenómeno natural. El estudio demostró que los estudiantes del mismo nivel educativo construyen una amplia gama de explicaciones para el mismo fenómeno que son indicativos de diferentes modos de razonamiento que van desde descriptivo-relacional a causal.

El objetivo de este estudio es analizar las dificultades en razonamiento de los mecanismos causales, en los estudiantes, de manera que contribuya a evaluar, cuestionar y revisar sus propias representaciones de un fenómeno en química, desde el planteamiento de interacciones de causa y efecto. Es importante llevar a los estudiantes a modelos de interacción molecular y hemos elegido el efecto Mpemba, porque los estudiantes no han tenido experiencia con el fenómeno. Esto nos permite partir de sus representaciones y utilizar sus propias observaciones y experiencias que cuestionan sus ideas previas.

Con el propósito de poder identificar los niveles de razonamiento, en estudios previos (Talanquer, 2018) se han definido niveles de razonamiento: Nivel I (Descriptivo), incluye respuestas que son de naturaleza descriptiva y se limitan reafirmando el fenómeno en diferentes palabras; Nivel II (relacional) se basa en asociaciones simples entre propiedades de las principales entidades del sistema; Nivel III (causal simple), las explicaciones se basan en las actividades de uno o más de las entidades del sistema; y Nivel IV (Emergente Mecanicista), se refieren a una organización de entidades y actividades en el espacio y tiempo para darle sentido al fenómeno. Grotzer (2003) indica que las explicaciones mecanicistas se caracterizan por el detalle en las descripciones de los procesos que son responsables del comportamiento de un sistema de interés y se basan en la identificación de entidades en un sistema, sus propiedades e interacciones, las actividades en las que participan, y los patrones de organización que manifiestan (Machamer *et al.*, 2000). Illari (2011) señala que un mecanismo para un fenómeno consta de entidades y actividades organizadas de tal manera que son responsables del fenómeno.

Los autores anteriores ponen de manifiesto que las actividades y la organización de las entidades componentes se consideran causalmente responsables de las propiedades y comportamientos del sistema en su conjunto, y la comprensión de esto contribuye al razonamiento causal de los estudiantes, que es el problema que nos ocupa. Dentro de este marco, las explicaciones mecanicistas se distinguen de otros tipos de explicaciones mediante la descripción y análisis de la organización espacio-temporal de las entidades que componen un sistema.

Efecto Mpemba

El efecto Mpemba es un fenómeno que se produce cuando dos masas iguales de agua a diferentes temperaturas son sometidas a un proceso de enfriamiento en un entorno bajo cero; observándose que la muestra de agua caliente se congela más rápido que la muestra que inicialmente estaba fría. Este aparente comportamiento anómalo, cuyo nombre se debe a Erasto B. Mpemba, tiene una interesante historia de controversias científicas y de explicaciones diferentes sobre el porqué y el cómo sucede.

Para la construcción de explicaciones teóricas y experimentales hechas hasta el momento se ha recurrido a diferentes conceptos dentro de los cuales están: evaporación, convección, superenfriamiento, entropía, convección térmica e interacciones no covalentes. Sin embargo, las controversias se han zanjado solamente de manera parcial (Tyrovolas

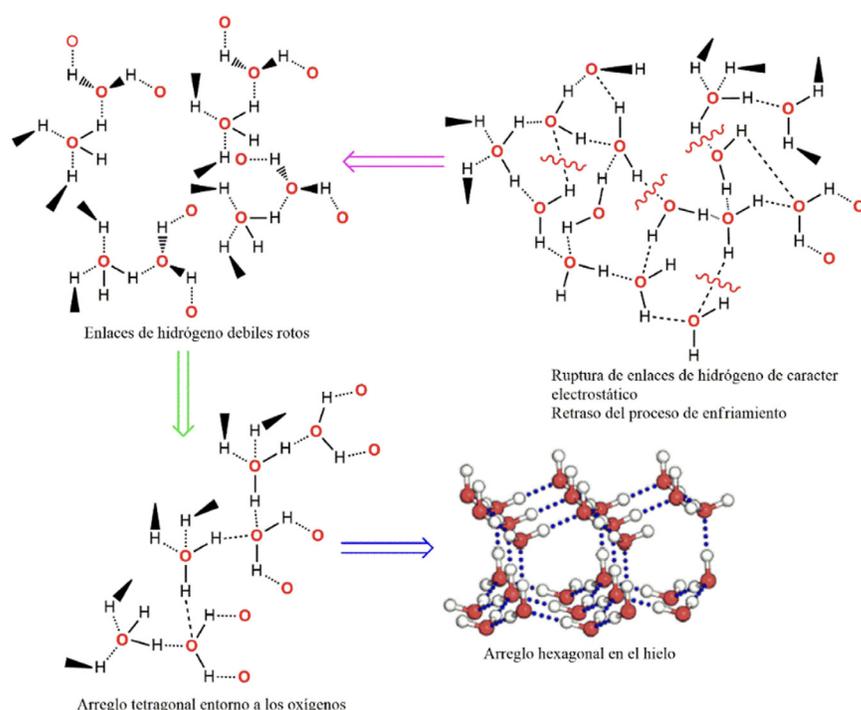
2017). A continuación, se mencionan algunos de los conceptos involucrados y la posible explicación dada desde cada uno.

Superenfriamiento: En este caso es un enfriamiento por debajo del punto de congelación sin que suceda un cambio de estado (formación de hielo), donde hay una fracción de moléculas que alcanzan temperatura por debajo del punto de congelación liberando energía hacia otras moléculas que luego alcanzan la temperatura de 0 °C y forman hielo (Huang et al. 2015). En el efecto Mpemba las moléculas de la muestra que inicialmente está a mayor temperatura sufren un menor superenfriamiento y, por lo tanto, forman hielo más rápido que las moléculas de la muestra que inicialmente estaban a menor temperatura, dado que estas alcanzan una temperatura más baja de superenfriamiento (Jeng 2006).

Evaporación: se sugirió que la evaporación conduce a una disminución en la masa de agua y a menor masa se requerirá menos energía y, por lo tanto, menor tiempo para enfriarse. Sin embargo, experimentalmente se ha demostrado que las pérdidas como resultado de un proceso de evaporación que harían disminuir la masa de la muestra y por ello disminuir el tiempo de congelación para la muestra de mayor temperatura no es suficiente, ya que las pérdidas no superan el 1,5% de la masa en rangos de temperatura entre 75 °C a -40 °C.

Gases disueltos: cualquier muestra de agua siempre tiene una pequeña cantidad de gas disuelto y la cantidad de gas depende de la temperatura de la muestra. J. H. Thomas atribuyó el efecto Mpemba a la cantidad de gases disueltos en el agua como causa de la diferencia en la velocidad de congelación de las dos muestras, descartando otras explicaciones como la independencia de la temperatura inicial y el superenfriamiento.

FIGURA 1. Mecanismo sugerido efecto Mpemba tomado y adaptado de(Tao et al. 2017).



Enlaces de hidrógeno: En el agua, el enlace covalente H-O se acorta cuando libera energía, y simultáneamente el enlace de hidrógeno se alarga en un proceso de relajación (Zhang, et al., 2014). Lo anterior, es acorde con los estudios hechos mediante modelación teórica, donde se ha planteado que con un leve aumento de la temperatura, los puentes de hidrógeno se rompen, favoreciendo el incremento en el número de enlaces de hidrógeno fuertes (Tao et al. 2017). La formación de estos enlaces fuertes es requisito geométrico para la formación de pequeños clústeres, favoreciendo el entorno tetragonal sobre el oxígeno y una posterior reorganización de una capa hexagonal en el hielo, como se observa en la Figura 1, logrando así una congelación más rápida en el agua a mayor temperatura.

Entropía: investigaciones recientes muestran diferencia de entropía entre las muestras de agua que se enfrían hasta alcanzar la misma temperatura, esto debido a que el aumento de temperatura aumenta la energía de las moléculas, hay contracción del enlace H-O covalente y un alargamiento o ruptura del puente de hidrógeno, lo cual conduce a un incremento del desorden y por ende a una mayor entropía. Sin embargo, cuando el proceso es inverso, es decir, se enfría rápidamente, la entropía interna no desciende rápidamente, sino que necesita un tiempo largo, es decir, que la estructura organizada a través de enlaces de hidrógeno no se rectifica instantáneamente, por lo que tendríamos dos cuerpos de agua a la misma temperatura con entropías distintas (Tyrovolas 2017), enfriándose más rápido aquella que tiene una mayor entropía.

En consonancia con lo anterior, en este documento se propone como cuestión lo siguiente: ¿Cómo explican el efecto Mpemba los estudiantes de un programa de formación docente? y ¿Qué dificultades se pueden identificar desde este análisis para pensar los mecanismos causales?

Metodología

Participantes: Este estudio se basó en las explicaciones que dieron 37 estudiantes de 8º semestre de un programa de formación docente de una universidad colombiana, 15 hombres y 22 mujeres, cuyas edades oscilan entre los 20 y 25 años. Los datos se recopilaron como parte del tema estrategias de enseñanza sobre conceptos en ciencias, en la asignatura *Taller experimental*. Todos los participantes dieron su consentimiento para participar en el estudio y se garantizó el anonimato.

Tarea: En una actividad de clase, se presentó un vídeo sobre el efecto Mpemba elaborado por los autores, se entrega un cuestionario a cada uno de los estudiantes para que lo completen de manera individual. El vídeo es presentado en diferentes momentos, en el primer minuto los estudiantes contestan la pregunta 1, luego al cabo de 10-15 minutos, se continúa proyectando el vídeo para que puedan contestar las preguntas, 2-6. (Ver la tabla 1). El cuestionario fue diligenciado en 90 minutos y fue construido con la intención de que los estudiantes piensan el fenómeno en distintas etapas sucesivas, como se explica en la tabla 1. Se basa en una experiencia de clase a la utilizada en Moreira et al. (2019) con el propósito de identificar y caracterizar diferentes niveles de razonamiento causal expresado en los estudiantes, del que se han tomado los ítems de por qué y dibuja o representa.

El profesor titular no intervino durante este tiempo y los estudiantes no tuvieron una preparación previa sobre el tema de mecanismos causales ni sobre el efecto Mpemba.

Las preguntas del cuestionario fueron planteadas como un protocolo semiestructurado de preguntas abiertas (Miles et al., 2014) y para su validación fueron discutidas con 4 expertos con recorrido académico en las áreas de Química y Física y en educación científica.

TABLA 1. Preguntas del cuestionario.

Preguntas derivadas del Video	Propósito y desarrollo de cada pregunta
1. Teniendo en cuenta el vídeo presentado que crees que ocurre al cabo de una hora y media y porque ocurre	<p>Se presenta a los estudiantes el inicio del video que consiste en tomar dos cantidades de agua en recipientes y volúmenes similares, uno contiene agua caliente (en ebullición) y el otro, agua a temperatura ambiente tomada directamente del grifo. Los dos recipientes se llevan al mismo tiempo al congelador. Una vez dejados los recipientes al congelador se plantea la primera pregunta.</p> <p>Se propone esta pregunta para que los estudiantes tengan la posibilidad de pensar el fenómeno y manifiesten hipótesis, esto permite evidenciar las concepciones que tienen antes de ver el efecto Mpemba.</p>

2. Describa lo que ocurre	Se continúa con la proyección del video, el cual muestra que, al cabo de una hora y media, el recipiente del agua caliente se congela primero. Por esta razón, se les cuestiona lo que vieron, lo cual permite contrastar concepciones.
3. ¿Cómo ocurrió?	A partir de lo observado en el video se continúa desarrollando el cuestionario. Esta pregunta tiene como propósito que los estudiantes manifiesten explicaciones causales del mecanismo, en este caso ver como ocurre el efecto Mpemba. Responder al <i>cómo</i> , permite pensar las interacciones moleculares, es decir, las actividades del fenómeno y permite comprender cuáles elementos producen el mismo efecto en ocasiones sucesivas. Aspecto que posibilita creer sobre modificaciones en el funcionamiento del fenómeno, construir conexiones entre conceptos y dar sentido a los sistemas y fenómenos (Talanquer, 2018).
4. ¿Por qué ocurrió?	La pregunta del <i>porqué</i> , permite a los estudiantes justificar y manifestar su comprensión sobre las transformaciones de los estados de los objetos a lo largo del tiempo que están involucrados en los procesos causales y conceptualizarlos como una cadena sucesiva de interacciones; es decir dar explicaciones sobre el efecto Mpemba.
5. Realice un esquema en el que señale el comportamiento de las moléculas en agua caliente a través del tiempo y describa el comportamiento de las moléculas en agua a los 10 min; 30 min; 1 h; 1.5 h.	La pregunta 5 y 6, permite comprender de mejor manera como ven los estudiantes el fenómeno en el espacio y tiempo, que es cómo funcionan los mecanismos. Se busca aquí llevarlos a un proceso de racionalización por tiempos de lo que sucede en el agua fría y caliente. Se plantea para que los estudiantes visualicen las transformaciones involucradas en los procesos causales continuos.
6. Realice un esquema en el que señale el comportamiento de las moléculas en agua fría a través del tiempo y describa el comportamiento de las moléculas en agua fría a los 10 min; 30 min; 1 h; 1.5 h	Esta pregunta pretende conseguir información adicional que permita entender los mecanismos causales.

Análisis de respuestas dadas por los estudiantes: Las explicaciones escritas fueron analizadas utilizando un método de comparación buscando patrones emergentes en las respuestas dadas por los estudiantes (Creswell 2013). Para esto se buscó agruparlas teniendo en cuenta los conceptos que se han usado para dar explicación al fenómeno y que estaban asociados en las respuestas dadas por los estudiantes, como cambio de estado de la materia, cinética molecular, transferencia de calor, enlaces de hidrógeno, entropía, convección, equilibrio térmico, transferencia de calor. Cada una de las respuestas fue analizada y clasificada por los autores de manera colectiva en varias sesiones hasta alcanzar un consenso; posterior a esto se efectuó un análisis semántico de las respuestas de los estudiantes para identificar conceptos asociados. Para ello, se empleó el algoritmo LDA (Asignación Latente de Dirichlet) con herramienta MALLET; esta herramienta permite identificar patrones de palabras similares. Esta técnica ha sido utilizada en el análisis de textos por Greene, O’Callaghan, and Cunningham (2014). Generalmente, se puede encontrar el número de categorías o conceptos generados. Esta verificación se efectuó luego de realizar un análisis manual de las respuestas en cada uno de los momentos, que se introducen en el programa, y este identifica los conceptos que aparecen. Los valores obtenidos se pueden observar en las figuras 2,3 y 4.

Análisis de las dificultades asociadas al razonamiento del mecanismo causal: Para ello se utilizan los niveles de razonamiento de Talanquer (2018), descritos en la introducción de este texto.

Para efectos de presentación de los resultados, se toman 3 momentos de la experiencia: *Antes* (descripción del experimento y pregunta 1); *Durante* (respuestas que describen que sucede en el fenómeno e involucra las preguntas 2, 3 y 4) *Después* (análisis del fenómeno, pensándolo desde lo micro e involucra las preguntas 5 y 6).

Las dos preguntas del *cómo y por qué* se plantearon para obtener las explicaciones que dan los estudiantes al fenómeno, sobre aspectos como interacciones y organización del sistema.

Se tomaron como referencia las diferentes explicaciones del efecto Mpemba, con el interés no de señalar respuestas buenas y malas, sino comprender desde qué marcos conceptuales los estudiantes explican dicho fenómeno.

Resultados y análisis

Teniendo en cuenta los aspectos metodológicos, los resultados se presentarán en el siguiente sentido. En primer lugar, se describen los conceptos asociados al efecto Mpemba dados por los estudiantes en los diferentes momentos de la experiencia. En segundo lugar, se efectúa un análisis de las dificultades de razonamiento sobre los mecanismos causales.

Conceptos Asociados

Antes del fenómeno

Para este momento, se les plantea la siguiente pregunta: *Teniendo en cuenta el vídeo presentado que crees que ocurre al cabo de una hora y media.*

Conceptos asociados	Ejemplos de respuestas
Cambio de estado de la materia	Se congela el agua de los dos recipientes, pero primero el agua fría
	Se congela el agua fría ya que es rápido el proceso de líquido a sólido mientras que el agua caliente se tarda por estar en estado gaseoso
Aproximación cinética molecular	Las moléculas al estar a un cambio de T reordenan sus átomos y por lo tanto las dos se congelan
	Ocurre una solidificación de las cubetas de agua, ocurriendo primero el proceso en la cubeta de agua caliente y luego en la cubeta de agua fría, puede ser porque el agua hirviendo libera más energía que el agua fría

TABLA 2. Respuestas de los estudiantes antes del fenómeno.

En esta pregunta los estudiantes ofrecen respuestas desde el sentido común, pues lo habitual es considerar que el agua fría se congela más rápido y fueron articuladas como cambio de estado en 23 estudiantes. Esta respuesta se asocia con el cambio de estado. En un segundo concepto, la respuesta se asocia a una aproximación cinética molecular, donde se involucran términos como reordenación de moléculas y liberación de energía.

En las respuestas se utilizan conceptos macroscópicos asociados a la termodinámica, pero desde el análisis de las partículas en interacción, en el frasco del agua caliente, es más probable que ocurran colisiones aleatorias que en el caso de la muestra en el agua fría, lo que hace que las moléculas de agua pierdan más energía cinética.

Reflexionando sobre el fenómeno, durante la observación del vídeo

En este apartado se propone a los estudiantes reflexionar sobre el fenómeno presentado en el vídeo. Se presentan las siguientes preguntas ¿Qué ocurre? ¿Cómo?, y ¿Por qué ocurrió?

Una vez transcurridas una hora y media, 18 estudiantes fundamentaron sus respuestas en conceptos asociados a la cinética molecular y utilizaron términos (refiriéndose a las moléculas) como *más juntas, más rápido, expansión*. Así mismo, 13 estudiantes describen el fenómeno ocurrido como cambio de estado y ofrecieron explicaciones macroscópicas de cambio de estado de líquido a sólido, no a lo que sucede a nivel molecular en dicho cambio. Dos respuestas fueron asociadas con el concepto de transferencia de calor en distintos medios, por el contacto de dos sistemas con diferentes temperaturas.

Otras respuestas como: *Los átomos se cargan (sic) energéticamente, lo cual permite una mayor actividad entre las moléculas, gracias a la carga que estas han adquirido por medio del calor*. La respuesta correlaciona el hecho de suministrar energía, en forma de calor, y la actividad que exhiben las moléculas como resultado de un aumento de su energía cinética; pero se debió tener en cuenta el aumento en la vibración de los enlaces y el proceso de superenfriamiento más relacionado con el movimiento de las moléculas y pérdida de energía por colisiones.

Frente a la pregunta: ¿Cómo ocurrió?

Conceptos asociados	Ejemplo de Respuestas Emitidas por los estudiantes
Cinetica Molecular	El agua caliente tiene moléculas de vapor y movimiento que las hace más livianas y por eso se congelo
Transferencia de calor	Los átomos del agua caliente liberan rápidamente energía al de agua fría, lo que conlleva a que no se congele tan rápido o a la misma velocidad
Enlaces de hidrógeno	Se congelan porque hay más distancia entre los enlaces de sus moléculas, debido a una fuerza repelente entre ellas, haciendo que los puentes de hidrógeno se estiren, y es así que presenta una energía, y esa energía se liberen.

TABLA 3. Respuestas sobre la pregunta ¿Cómo ocurrió?

Las respuestas relacionadas con *cómo sucede* no evidencian una conceptualización sobre el mecanismo por el cual sucede la congelación, pero mantienen una correlación con conceptos como flujo de calor y cinética molecular. Se encontró que 11 respuestas relacionaban el concepto de cinética molecular y la energía asociada con el cambio de temperatura; sin embargo, no hay claridad en cómo es la pérdida de energía para llegar al proceso de solidificación observado para la muestra de agua a mayor temperatura. También 17 respuestas se asocian con el flujo de calor, como resultado del contacto de dos superficies a diferentes temperaturas que llegan a un equilibrio térmico. En este caso no es evidente la direccionalidad en el flujo de calor acorde con la termodinámica.

Esta pregunta presentó dificultad para los estudiantes, ya que la mayoría de ellos manifiestan explicaciones del fenómeno desde conceptos como cinética molecular, enlaces de hidrógeno, transferencia de calor y responden al porqué, no al cómo.

En relación con la pregunta ¿Por qué ocurrió?

La respuesta del *por qué* implica que los estudiantes construyen explicaciones desde el punto de vista macroscópico y desde el molecular. Algunos estudiantes mencionan las interacciones moleculares para dar una explicación al fenómeno, pero no hay claridad del mecanismo que involucra los enlaces de hidrógeno. Así mismo, otros estudiantes relacionaron procesos de relajación dinámica para explicar el fenómeno. Al respecto, los resultados experimentales muestran que los procesos de relajación del enlace O-H, les permiten ser más largos cuando hay pérdida de energía y por esto hay disminución de la temperatura en el agua y también un aumento de la cantidad de enlaces de hidrógeno. En este sentido, las respuestas argumentan desde una pérdida de energía en las moléculas y una posterior disminución de la distancia intermolecular, para luego cambiar de estado; sin embargo, no establecen una diferenciación en el proceso para las dos muestras a diferente temperatura.

Las respuestas relacionadas con procesos de transferencia de calor son congruentes para alcanzar un equilibrio térmico entre la muestra de agua y el refrigerador. Aquí hay un acercamiento a un proceso de superenfriamiento como producto de un cambio abrupto de la temperatura que lleva a procesos de enfriamiento rápido, sin que haya un adecuado acomodo espacial de las moléculas, como si sucede en la muestra a baja temperatura donde el proceso de relajación es más lento.

Este tipo de preguntas les permite imaginar lo sucedido a nivel micro, es el caso de las explicaciones ofrecidas con el concepto de enlaces de hidrógeno. También se percibe que las explicaciones están basadas en el comportamiento de las moléculas en los dos estados del agua y la influencia de la temperatura. En las respuestas que se asociaron con cinética molecular son coherentes, pero no se abordan asociaciones con la pérdida de energía.

Después de la experiencia

Una vez finalizada la experiencia se plantearon preguntas que permiten tener una representación del fenómeno:

Conceptos asociados	Ejemplo de Respuestas Emitidas por los estudiantes
Convección	En el agua caliente lo que empieza a congelarse son las moléculas de vapor y estás van a congelar las siguientes hasta que queda completamente congelado
Enlaces de hidrógeno	A los 10 primeros minutos las moléculas de agua están en estado líquido, pero con menor temperatura y las partículas están más relajadas, al paso del tiempo se organizarán las moléculas por medio de la formación de puentes de hidrógeno permitiendo que se congele el agua.
Entropía	A los 10min sólo recibe un cambio leve de temperatura. A los 30min las moléculas ya se encuentran un poco más expandidas. Después de 1h dichas moléculas ya se encuentran en proceso de expansión y distribuidas uniformemente. Después de 1h y 15min ya tiene sus procesos de cristalización, hay capas de hielo en el exterior del recipiente.

TABLA 4. Explicaciones de los esquemas dadas por los estudiantes de lo sucedido en agua caliente.

La descripción del comportamiento molecular conlleva un acercamiento al concepto de microestados que involucra conceptos de cinética molecular, entropía e interacciones moleculares no covalentes como enlaces de hidrógeno. Alrededor de 20 respuestas correlacionan la disminución del número de choques entre moléculas al disminuir la

temperatura, con un aumento de la intensidad en las interacciones para luego congelarse.

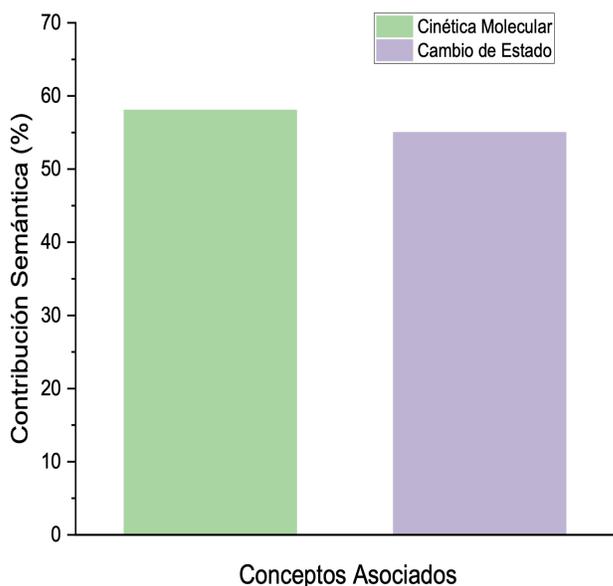
La dispersión de las moléculas en 7 respuestas es atribuida a procesos de entropía (esta palabra es señalada en algunos casos de manera directa o en otras hacen relación al cambio de energía interna por la temperatura) que pueden ser relacionados con el cambio de estado líquido a sólido, donde aparentemente se tendría un menor volumen. Sin embargo, no es completamente acorde con la evidencia experimental de menor densidad en el hielo en comparación con el agua líquida y por ende menor volumen. Nueve respuestas solamente relacionan la disminución de temperatura como condición para llegar al punto de congelación, sin que haya una reflexión sobre el comportamiento de las moléculas durante el proceso.

De manera general, para todas las respuestas el fenómeno está explicado por los estudiantes desde variables a nivel macroscópico, no hay una interpretación de la variable macroscópica como la sumatoria de microestados. Por eso resulta difícil construir un mecanismo para resolver el cómo del fenómeno.

Finalmente, se les pide a los participantes que describan el comportamiento de las moléculas en agua fría a través del tiempo. Algunos aluden el cambio de los enlaces de hidrógeno, al bajar la temperatura. Sin embargo, no hay explicación clara sobre el mecanismo de cómo sucede el fenómeno a nivel molecular. En otras respuestas se relaciona la cinética molecular con la entropía a través de la temperatura. De manera menos específica está presente el concepto de convección como una interpretación del proceso de congelación, incluyendo la formación de una capa inicial que luego va creciendo. En este caso, se observa poca argumentación del mecanismo de transferencia de calor para la formación del sólido. Al concepto de transferencia de calor se pueden atribuir algunas de las respuestas, en que hay una relación entre la pérdida de calor de las muestras en relación con el tiempo; sin embargo, no explica la direccionalidad de la transferencia de calor.

Se observa que hay descripción secuencial en el tiempo de lo que sucede en el fenómeno; sin embargo, hay dificultad para detallar lo que sucede a nivel de las interacciones moleculares, por lo cual los estudiantes utilizan términos como las moléculas se separan más o menos.

FIGURA 2. Momento antes experimento.



Análisis semántico para identificar los conceptos asociados al efecto Mpemba en las explicaciones de los estudiantes

Con el propósito de analizar la asociación de palabras en cada uno de los momentos del experimento, se efectúan mediante LDA Mallet que permiten identificar los conceptos más utilizados por los estudiantes para construir las explicaciones en los diferentes momentos.

La figura 2 representa los conceptos involucrados del fenómeno antes de ser observado por los estudiantes. Se aprecian conceptos de cinética molecular y cambios de estado en sus explicaciones.

En la figura 3, durante la observación del fenómeno, los estudiantes asocian otros conceptos aprendidos en su química universitaria como enlaces químicos, transferencias de calor y

relajación dinámica; sin embargo, se observó que los conceptos asociados para explicar el fenómeno no se vinculan a ningún tema químico específico.

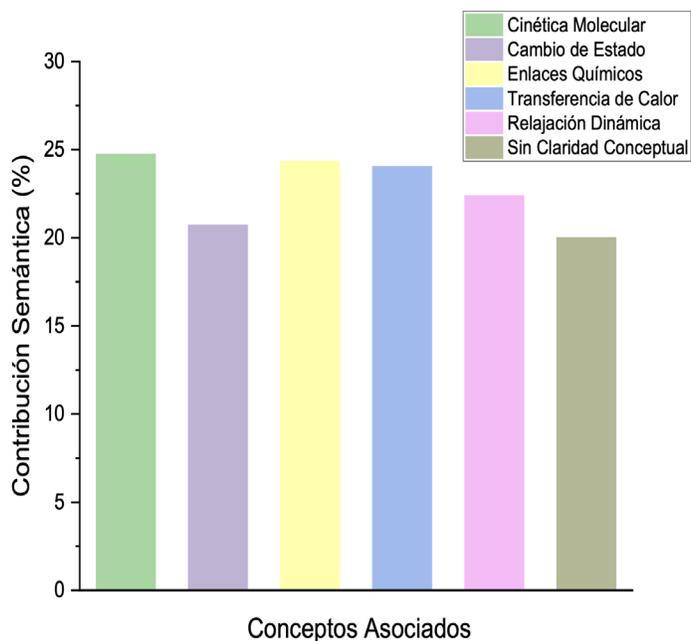


FIGURA 3. Durante experimento.

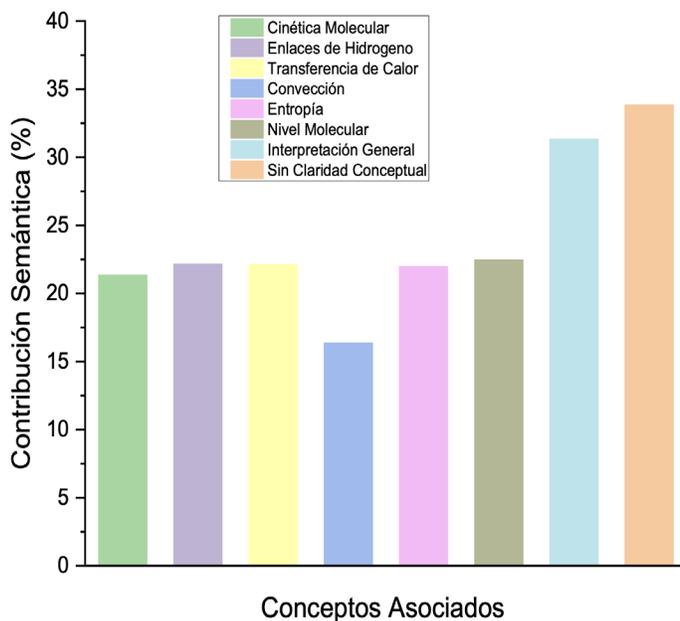


FIGURA 4. Después del experimento.

En la figura 4, representa las explicaciones de los estudiantes después de observar el fenómeno y analizarlo, aparece la contribución semántica de otros conceptos químicos importantes como enlaces de hidrógeno, convección, entropía y nivel molecular, sin embargo, sus explicaciones son muy generales (columna azul) y aumenta la dificultad de argumentar fisicoquímicamente el fenómeno (columna anaranjada). Interpretamos esta

dificultad de los estudiantes en explicar el fenómeno debido a que han aprendido química universitaria fundamental en la que el efecto Mpemba no es explicado, por lo cual les resulta novedoso e interesante, al tratarse de un comportamiento inesperado.

Se evidencia un aumento de conceptos en cada uno de los momentos de la experiencia, siendo menor el primer momento y robusteciéndose más en el tercero.

Tomando en cuenta, la contribución semántica identificada, se presenta a continuación, la relación entre la contribución semántica con las partes del mecanismo (Efecto Mpemba), para esto se asumió la definición de Illari (2011), sobre mecanismo en el que se plantean las siguientes categorías que permiten analizar las explicaciones dadas por los estudiantes:

Partes del mecanismo analizados	Descripción en el efecto Mpemba
Identificación de entidades	Las entidades son las cosas que participan en las actividades. Son los componentes materiales del sistema, En el efecto Mpemba sería moléculas, agua, electrones, pares electrónicos
Identificaciones de Actividades	Las <i>actividades</i> se asumen como los componentes de los mecanismos que producen el cambio, es decir, acciones que ocasionan el cambio. Son las “cosas que hacen las entidades y constituyen mecanismos y etapas de despolarización de mecanismos” (Craver, 2007). En ese orden, en el efecto Mpemba son la ruptura y formación de los enlaces de hidrógeno, los cambios en la energía cinética de las moléculas, transferencia de energía, enlaces de hidrógeno.
Patrones de organización	Aquí se pretende que los estudiantes expliquen secuencia de procesos del efecto Mpemba, por ejemplo, cómo se organiza las partículas. Al inicio del fenómeno se espera que identifiquen la aleatoriedad en la organización de las moléculas que corresponde a explicar principios de entropía. Luego del momento inicial, es decir, durante el proceso, se debe manifestar los cambios de disminución de energía cinética, así como un cambio en las interacciones moleculares, de manera que al final identifiquen una estructura organizada a nivel molecular con baja entropía ensamblada a través de enlaces de hidrógeno. Esto significa comprender como una actividad conduce a la siguiente a través de la distribución espacial de los componentes.

TABLA 5. Categorías Analizadas.

El análisis de la contribución semántica muestra que, en el segundo y tercer momento de la experiencia, hay un aumento de la complejidad conceptual para dar explicación al fenómeno, pudiéndose observar conceptos que hacen parte de la construcción de un mecanismo causal. Dentro de la primera parte relacionada a la identificación de entidades que intervienen en el proceso, la contribución semántica incluye las moléculas, átomos, electrones y pares electrónicos, mientras que en la segunda parte se identifican actividades relacionadas con las identidades como cinética molecular, transferencia de energía entre moléculas, enlaces de hidrógeno y entropía; sin embargo, no se observa contribución semántica que obedezca a patrones de organización como resultados de la correlación entre las entidades (moléculas) y las acciones que estas desarrollan para llegar al punto de solidificación mediante el efecto Mpemba. Acorde con este hallazgo, es claro que los estudiantes no alcanzan a llegar al nivel más complejo que implica la inclusión de conceptos relacionados con organización estructural de las moléculas en estado sólido.

Patrones de razonamiento

En el apartado anterior, presentábamos los conceptos indicados por los estudiantes para explicar el efecto Mpemba. Aquí se presentan los patrones de razonamientos identificados con la experiencia.

La clasificación anterior permite inferir algunas dificultades para pensar las interacciones moleculares en tiempo y espacio y ver la secuencia sucesiva de eventos por la que se sucede el efecto Mpemba, por lo cual la mayoría de las respuestas se quedan en un nivel descriptivo y relacional que evidencian algunos conceptos involucrados como flujo de calor, cinética molecular, pero no se ofrece una explicación sobre el mecanismo por el cual sucede el proceso de congelación.

Nivel	Descripción
Nivel I: Descriptivo	Aquí colocamos respuestas que solo se quedan en la descripción macroscópica del fenómeno, por ejemplo, <i>el agua se congelo por su cambio de temperatura; Hubo un cambio de temperatura brusco</i> . En estas respuestas solo se ofrece una descripción de sus entidades sin relatar aspectos de actividades. <i>Al existir una diferencia de T del recipiente del agua caliente al congelador se produce una congelación más rápida</i>
Nivel II: relacional	Las respuestas clasificadas en este nivel establecen algunos vínculos entre entidades y propiedades, por ejemplo: <i>El agua caliente tiene moléculas de vapor y por el movimiento se hacen más livianas y por eso se congela</i>
Nivel III: causal simple	Estas explicaciones los estudiantes pueden relatar acciones de las entidades y actividades; por ejemplo: <i>el comportamiento de las moléculas al entrar en contacto con T más baja se inician a equilibrar térmicamente haciendo que se congelen</i>
Nivel IV: mecanicista emergente	Las explicaciones aluden identificación de entidades y actividades en tiempo y espacio con organización temporal <i>En la primera fase las moléculas se encuentran en un estado de excitación, luego la T hace que se reduzca el choque de partículas, luego aumenta la presión porque baja la T hasta que se congelan</i>

TABLA 6. Niveles de razonamiento.

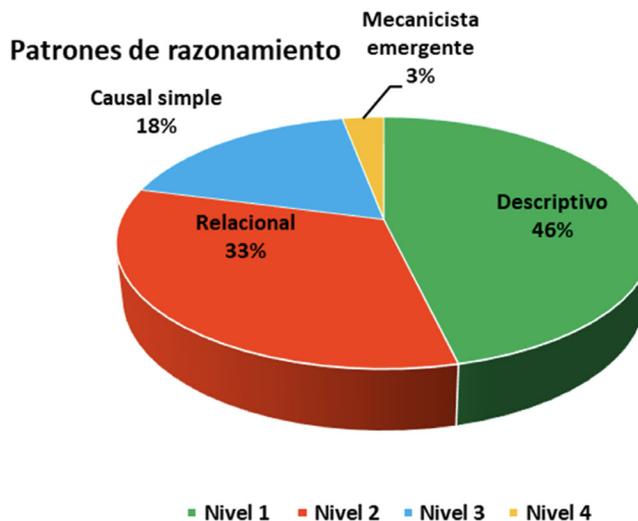


FIGURA 5. Patrones de Razonamiento.

Como se observa en la gráfica, el patrón de razonamiento en nivel 1(46%) muestra que las repuestas apuntan a mencionar el fenómeno de manera general, asociando conceptos con congelación, cambio de estado, donde solamente hay una descripción en términos macroscópicos sin entrar en detalles; sin embargo, un buen porcentaje alcanza el nivel 2, es decir que ya incluyen relaciones entre el comportamiento de las moléculas de agua en relación con otras variables como la temperatura y la formación de enlaces de hidrógeno. Al avanzar hacia el nivel 3 el porcentaje es mucho más bajo como resultado de la complejización en las descripciones de los eventos microscópicos como procesos de relajación dinámica, cambios de energía cinética en las moléculas de agua, formación de enlaces de hidrógeno con la intervención de pares electrónicos libres en las moléculas

de agua y la organización primaria tetragonal en torno al oxígeno para dar origen al efecto Mpemba. Finalmente, en el nivel más alto se observa que un nivel de organización emergente, secuencial para explicar el fenómeno en tiempo y espacio, dificulta razonar completamente los fenómenos desde el punto de vista causal.

En algunos casos se presentan relaciones de causas como flujo de calor, pérdida de energía y cinética molecular principalmente, pero no se obtiene con claridad las acciones de las entidades, por lo cual en estas respuestas no hay claridad del cómo es la pérdida de energía para llegar al proceso de solidificación observado primero para la muestra de agua a mayor temperatura.

Conclusiones

Los estudiantes sólo ofrecen explicaciones generales del fenómeno. Se observan claras limitaciones para resolver la pregunta sobre *cómo sucede el fenómeno*, lo cual evidencia dificultades de los estudiantes para identificar aspectos de organización en los fenómenos a nivel micro y para describir eventos de secuencialidad de las actividades en el mecanismo, esto dificulta tener modelos adecuados de representación, de las interacciones moleculares.

La experiencia permite evidenciar como a medida que se avanza en el análisis del efecto, los estudiantes tienen más oportunidades para mostrar los conceptos asociados al fenómeno, esto sugiere que debe darse la oportunidad para argumentar lo observado con preguntas de profundidad (comparar, contrastar, refutar, persuadir las respuestas dadas). De otra parte, se observa la dificultad de los estudiantes para pensar el funcionamiento a nivel molecular de los mecanismos, es decir pensarlo en términos de tiempo-espacio y como entidades que generan actividades.

La mayoría de las explicaciones fueron clasificadas en un nivel de razonamiento descriptivo y relacional que da cuenta de conceptos asociados con congelación, es decir, descripción en términos macroscópico, por lo cual el uso de descripciones a nivel molecular es poco frecuente, lo cual impide ver las partes y procesos que interactúan causalmente en el funcionamiento del efecto Mpemba.

Los resultados inciden en la necesidad de estimular el pensamiento causal de los estudiantes. Para ello hay que llevar a cabo prácticas y actividades donde los estudiantes respondan al cómo de las cosas y la secuencialidad de funcionamiento del fenómeno, pues se evidencian dificultades para reflexionar las causas de episodios en el fenómeno (en tiempo y espacio). En muchos de los casos, los estudiantes utilizan los conceptos del nivel molecular, pero no pueden explicar los mecanismos y las etapas que los involucran, así como conectar diferentes niveles de organización.

En consecuencia, hay que diseñar secuencias de aprendizaje que involucren estrategias experimentales para que los estudiantes puedan comprender los mecanismos causales, comprendiendo el modo de acción de las partículas básicas, lo que a su vez facilita entender entidades más complejas y favorece la capacidad de abstracción.

Por último, señalar que la comprensión de las relaciones causales es una contribución importante para el desarrollo del pensamiento crítico de los estudiantes, junto a otras como rechazar conclusiones no basadas en pruebas, cuestionar la validez de los argumentos y detectar falacias, ya que el pensamiento pseudocientífico utiliza relaciones causales espurias (Torres et al., 2022).

Referencias

- Clement, C. A., and Yanowitz, K.L. (2003). Using an analogy to model causal mechanisms in a complex text. *Instructional Science*, 31(3), 195-225.
- Craver, Carl F. (2001). Role Functions, Mechanisms, and Hierarchy. *Philosophy of Science*, 68(1):53-74.
- Craver, C. and Tabery, J. (2017): "Mechanisms in Science", en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, E. N. Zalta, ed., <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/science-mechanisms/>
- Creswell, J.W. (2013). Steps in conducting a Scholarly Mixed Methods Study: What I Am Looking for Core Characteristics: Do You Have a Quantitative Database? (Closed-Ended). *University of Nebraska - Lincoln*, 54.
- Glennan, S. (2005). Modeling Mechanisms. *Studies in History and Philosophy of Science, Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36(2):443-64.
- Greene, D., O'Callaghan, D. and Cunningham, P. (2014). How Many Topics? Stability Analysis for Topic Models. Pp. 498-513 in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Vol. 8724 LNAI.
- Grotzer, T. A. 2003. Learning to understand the forms of causality implicit in scientific explanations. *Studies in Science Education*, 39,1-74.
- Huang, Y., Zhang, X., Ma, Z., Zhou, Y., Zheng, W., Zhou, J., and Sun, C.Q. (2015). Hydrogen-Bond Relaxation Dynamics: Resolving Mysteries of Water Ice. *Coordination Chemistry Reviews* 285, 109-65.
- Illari, P. M. (2011). Mechanistic evidence: disambiguating the Russo-Williamson thesis. *International Studies in the Philosophy of Science* 25(2), 139-157. DOI: [10.1080/02698595.2011.574856](https://doi.org/10.1080/02698595.2011.574856)
- Jeng, M. (2006). The Mpemba Effect: When Can Hot Water Freeze Faster than Cold? *American Journal of Physics* 74(6):514-22
- Koslowski, B. (1997). *Theory and Evidence: The Development of Scientific Reasoning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Machamer, P., Darden, L., and Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of science* 67(1), 1-25. <https://www.jstor.org/stable/188611>
- Metz, K. E. (1991). Development of explanation: Incremental and fundamental change in children's physics knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 785 - 797.
- Miles, M.B., Huberman, A.M. and Saldaña, J. (2014). *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook (3rd Ed.)*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Moreira, P., Marzabal, A. and Talanquer, V. (2019). Using a Mechanistic Framework to Characterise Chemistry Students' Reasoning in Written Explanations. *Chemistry Education Research and Practice* 20(1):120-31

- Russ, R.S., Scherr, R.E., Hammer, D. and Mikeska. J. (2008). Recognizing Mechanistic Reasoning in Student Scientific Inquiry: A Framework for Discourse Analysis Developed from Philosophy of Science. *Science Education* 92(3):499–525.
- Schauble, L. (1996). The Development of Scientific Reasoning in Knowledge-Rich Contexts. *Developmental Psychology* 32(1):102–19.
- Solbes, J. and Tarín, F. (2008). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, 22: 155-180 <https://ojs.uv.es/index.php/dces/article/view/2415>
- Talanquer V., (2018), Exploring mechanistic reasoning in chemistry, in Yeo J., Teo T. W. and Tang K. S. (ed.), *Science Education Research and Practice in Asia-Pacific and Beyond*, Singapore: Springer 39–52
- Tao, Y., Zou, W., Jia, J., Li, W. and Cremer, D. (2017). Different Ways of Hydrogen Bonding in Water - Why Does Warm Water Freeze Faster than Cold Water? *Journal of Chemical Theory and Computation* 13(1):55–76.
- Torres, N.Y., Corrêa, T.H.B., and Solbes, J. (2022). Relaciones causales explicativas en la educación científica y su contribución al pensamiento crítico. *Investigações Em Ensino De Ciências*, 27(3), 239–253. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2022v27n3p239>
- Tyrovolas, I. J. 2017. Explanation for the Mpemba Effect. *Journal of Modern Physics* 08(12):2013–20.
- Zhang, X., Huang, Y., Ma, Z., Zhou, Y., Zhou, J., Zheng, W., Jiang, Q. and Sun, C.Q. (2014). Hydrogen-Bond Memory and Water-Skin Supersolidity Resolving the Mpemba Paradox. *Physical Chemistry Chemical Physics* 16(42):22995–2.