

Experimentos con reacciones químicas que dificultan la consideración de los procesos físicos relevantes para su explicación: una propuesta para su enseñanza

Juan Quílez Pardo 

*Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química. RSEQ - RSEF.
España. jquilez@uji.es*

[Recibido: 27 febrero 2024, Revisado: 3 julio 2024, Aceptado: 21 julio 2024]

Resumen: Este trabajo analiza dos experimentos que tienen como contexto una reacción de combustión. La producción de esta reacción química complica para los estudiantes el entendimiento de los resultados finales debido a la gran cantidad de conceptos que deben considerar y al empleo de un razonamiento causal lineal que supone la reducción funcional de las variables implicadas. Esta dificultad ha provocado su incorrecta explicación no sólo por parte de alumnos de diferente nivel académico, sino que también de profesores de ciencias en formación, autores de libros de texto e incluso investigadores en enseñanza de las ciencias. Con el objetivo de mitigar la enorme demanda cognitiva que supone el entendimiento de estos dos procesos, se propone una serie de experimentos previos que permiten acotar su estudio. Esta menor exigencia de entendimiento inicial presenta la potencialidad de que el alumnado pueda centrarse finalmente en los aspectos conceptuales relevantes, lo que pretendidamente le va a facilitar la utilización de su conocimiento previo referido al comportamiento físico de los gases. En cualquier caso, para su completo desarrollo en el aula, el papel del profesorado se manifiesta esencial. En este sentido, quedaría pendiente averiguar el grado de indagación orientada que puede resultar más efectivo.

Palabras clave: Demostraciones químicas; Indagación; Combustión; Presión atmosférica; Pensamiento causal lineal.

Experiments with chemical reactions that hinder taking into account the relevant physical processes for their explanation: a proposal for their teaching

Abstract: This work analyses two experiments that have a combustion reaction as their context. The production of this chemical reaction complicates to students the understanding of the final results, due to both the large number of concepts that they must consider and their use of causal linear reasoning that entails the functional reduction of the variables involved. This difficulty has led to their incorrect explanation not only by students of different academic levels, but also by preservice science teachers, textbook authors and even science education researchers. In order to mitigate the enormous cognitive demand involved in the understanding these two processes, a collection of previous experiments is proposed that allow to delimit their study. This initial lower understanding requirement may enable students to eventually focus their attention on the relevant conceptual elements, which is intended to make easier for them to use their prior knowledge concerning the physical behavior of gases. In any case, for their complete implementation in the science classroom, the role of teachers seems essential. This way, it would remain to be determined which grade of guided inquiry might be the most effective.

Keywords: Chemical demonstrations; Inquiry; Combustion; Atmospheric pressure; Linear causal thinking.

Para citar este artículo: Quílez, J. (2024). Experimentos con reacciones químicas que dificultan la consideración de los procesos físicos relevantes para su explicación: una propuesta para su enseñanza. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. 21(3), 3204. doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i3.3204

Introducción

Las demostraciones de física y de química poseen una larga tradición como un importante recurso didáctico (González et al., 2013; Hubbard, 2017; Tomás-Serrano y García-Molina, 2015; Unesco, 1978). Muchos de estos experimentos resultan potencialmente adecuados para desarrollar la motivación del alumnado en el estudio de estas materias (Proksa et al.,

2023). Además, estas actividades de laboratorio se pueden aprovechar como excelentes recursos de indagación científica al convertirse en contextos de aprendizaje en los que los estudiantes argumentan científicamente mediante la predicción y el intento de explicación de los hechos observados (Katchevich et al., 2013). Estas investigaciones escolares son más efectivas cuando los elementos de complejidad cognitiva que presentan para el alumnado se facilitan mediante ayudas y orientaciones del profesorado (Gericke et al., 2022), particularmente las que suponen proporcionar explicaciones en sistemas de causalidad múltiple (Perkins y Grotzer, 2005).

El primer objetivo de este trabajo es el análisis pormenorizado de dos demostraciones que, por su espectacularidad, tienen una larga tradición tanto en contextos formales de enseñanza de la ciencia como en otros ambientes menos reglados (jornadas lúdicas, ferias escolares, conferencias divulgativas, etc.). Ambos casos comparten que se parte de una reacción de combustión. Como veremos, se trata de situaciones cognitivamente muy complejas, de difícil entendimiento, por lo que inicialmente este trabajo se centra en explicar con detalle lo que ocurre cuando esa reacción cesa: a) una vela encendida que se apaga cuando, estando apoyada en una base que contiene agua, se cubre con una probeta invertida (u otro objeto semejante), lo que provoca que el agua ascienda en su interior; b) un huevo cocido pelado que tapa la boca de un matraz (o de una vasija de boca ancha semejante) es succionado cuando se apaga un trozo de papel que está ardiendo en su interior (como alternativa se puede emplear, con precaución, un pequeño pedazo de algodón, empapado ligeramente en alcohol etílico o también una vela, que es el caso que se ejemplifica en este estudio). La ilustración del primer experimento se pospone para la discusión final y la que corresponde a la aspiración del huevo se realiza en la figura 1.



Figura 1. Secuencia de imágenes que corresponden a la succión de un huevo cocido en el interior de un recipiente cuando al taponarlo se apaga una vela encendida en su interior.

Una vez completado este primer análisis, este estudio tiene como propósito la realización de un trabajo bibliográfico que oriente al profesorado en la fundamentación de diseños de actividades específicas que permitan superar las dificultades encontradas para su comprensión. En concreto, la discusión que se realiza puede servir de base que justifique la elaboración de una secuencia de aprendizaje para un grupo de alumnos concreto, así como la realización de una investigación con participación de alumnos de distinto nivel académico.

Para alcanzar estos objetivos, inicialmente se estudian las interpretaciones incorrectas con las que se suelen explicar estos dos procesos, así como la complejidad que supone la consideración de los factores que permiten su entendimiento. Posteriormente, se propone una serie de actividades prácticas que presentan una menor demanda cognitiva. La reducción de la dificultad de interpretación de los hechos observados se realiza mediante un control de las principales variables implicadas, lo que pretende facilitar que los estudiantes de secundaria construyan de forma sólida sus explicaciones. Este adecuado desarrollo conceptual inicial puede facilitar que los alumnos finalmente superen los errores que manifiestan en la comprensión de los dos experimentos señalados.

Experimentos de física con una reacción de combustión como escenario

El primero de los experimentos referidos (vela encendida que se apaga el interior de un vaso invertido que se apoya sobre una base que contiene agua) tiene una larga tradición histórica (Vera et al., 2011), habiendo sido incorporado tanto en libros de texto (Peckham, 1993) como en manuales de demostraciones químicas (Shakkashiri, 1985).

De forma paralela, esta discusión se complementa con el análisis del segundo de los experimentos referidos (succión de un huevo duro en el interior de un recipiente de boca ancha, una vez se ha cesado una reacción de combustión en su interior) (Adcock, 1998). Se puede profundizar para establecer una mayor semejanza entre ambos procesos si se realiza una pequeña variación en el procedimiento de este segundo estudio (Shamos, 1975; Science World Society, 2024). Este cambio consiste en colocar una cerilla encendida (o una pequeña vela) en el vértice superior del huevo duro, acercando un matraz invertido, de forma que el huevo encaje en su boca y la cerilla quede en su interior. Cuando ésta se apaga, el huevo sube, entrando en el matraz.

Veremos cómo en ambos casos el estudio de lo que ocurre requiere el análisis de varios factores, lo que complica su entendimiento. Se trata de ayudar al alumnado a que tome en consideración una serie de cambios físicos que suponen variaciones de presión en un contexto en el que ha ocurrido una reacción de combustión.

De esta forma, se pretende que los estudiantes superen reglas de inferencia de uso cotidiano, cuya construcción y aplicación se ha denominado ‘metodología de la superficialidad’ (Carrascosa y Gil, 1985), como contraste al empleo de una metodología científica rigurosa. Estas reglas utilizan patrones de pensamiento de sentido común, ya que no sólo son superficiales, rápidas y seguras, sino que además están asociadas al empleo de un razonamiento causal espontáneo y simple (Pozo et al., 1991), en el que lo que no se percibe, no se concibe. Este tipo de pensamiento limita la explicación de un sistema conceptualmente complejo mediante la simplificación que supone la fijación en sólo uno de sus elementos (Anderson, 2010), lo que está asociado a una reducción funcional de las variables implicadas (Rozier y Viennot, 1991).

Explicaciones incorrectas

En varios trabajos se ha señalado que estos dos experimentos se han explicado erróneamente por alumnos de secundaria. De forma un tanto sorprendente, estos razonamientos causales erróneos también los han manifestado futuros profesores de ciencias e incluso algunos investigadores de estas áreas de conocimiento.

Se ha indicado que tanto la subida del nivel de agua en el primero de los dos experimentos referidos (Birk y Lawson, 1999; Clark, 2009; Glanz, 1963; Peckham, 1993; Riveros, 2012; Stocklmayer, 1988; Vera et al., 2011) como la entrada del huevo en el interior del matraz (DeLorenzo, 1996; Moran, 1996; Obendrauf, 1997; Shamos, 1975; Thayer, 1975) se deben al consumo (completo) del oxígeno del aire presente. Por ejemplo, en el caso particular de

la vela apoyada sobre una cubeta con agua, Kovaks (2008) señala que el vapor de agua producido condensa en las paredes del vaso y que el dióxido de carbono se disuelve en el agua, de forma que el agua de la base sube hasta ocupar el 21% del volumen inicialmente ocupado por el oxígeno. Por su parte, otros investigadores (Arrigoni, 1975; Kolb et al., 1995) explican que, en el caso del huevo, el agotamiento del oxígeno presente por la combustión producida reduce la presión en el interior del matraz, por lo que al ser la presión atmosférica mayor, se provoca que sea succionado hacia dentro de este recipiente.

El experimento de entrada de agua en el recipiente que tapa una vela que se apaga ha sido utilizado en investigaciones con alumnos del último curso de enseñanza secundaria obligatoria y con futuros profesores de magisterio en formación (García-Rodeja y Sesto, 2016; Kim et al., 2012; Yoon et al., 2012) para estudiar qué hipótesis generaban a partir de su conocimiento previo de física y de química, así como para averiguar si eran capaces de contrastar su validez en función de las pruebas disponibles. A pesar de que el comportamiento físico de los gases se estudia en tercero de la ESO, las hipótesis y las explicaciones de los estudiantes normalmente fueron muy pobres, sin relación con este conocimiento estudiado previamente. Además, la referencia al agotamiento del oxígeno se asoció en muchos casos a la disminución de la presión en el interior del recipiente que tapaba la vela, así como otras referencias incorrectas respecto al dióxido de carbono.

Por otro lado, en un estudio con licenciados en física y en química que estaban realizando el curso para futuros profesores de secundaria (Leite y Afonso, 2004), de nuevo las explicaciones mayoritarias se centraron en la consumición del oxígeno como el factor que originaba las diferencias de presión.

Estos errores están asociados a la producción de una reacción de combustión con la evidente participación del oxígeno como reactivo que se consume. Se asume que la disminución de la cantidad de este gas es el único factor que provoca las diferencias de presión que se producen en cada caso. Esta fijación causal oculta la complejidad que posee el completo entendimiento de estos experimentos, lo que impide considerar los procesos físicos que sí que son relevantes en su explicación (Clark, 2009; Glanz, 1963; Lucas y García-Rodeja, 1989; Peckham, 1993).

Reacción incompleta de oxígeno

Las reacciones de combustión en recipiente cerrado son incompletas, por lo que el porcentaje de oxígeno en el aire sólo se reduce en una pequeña cantidad (MacNeil y Volaric, 2003). En este sentido, Birk y Lawson (1999) señalan que los intentos de determinación del porcentaje de oxígeno en el aire mediante reacciones de combustión no son apropiados, ya que el oxígeno no se consume completamente.

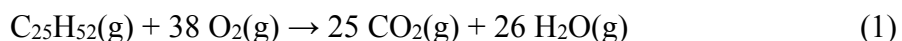
La vela se apaga cuando se ha consumido sólo en torno a un 7% del oxígeno inicialmente presente (Clark, 2009; Peckham, 1993; Que et al., 2020; Tomás-Serrano y García-Molina, 2023). En el caso del primer experimento referido, la reducción en determinadas circunstancias de un 21% del volumen ocupado por los gases al final del proceso, que algunos autores han señalado como prueba del porcentaje de oxígeno en el aire (Lawson et al., 1999), se debe a la combinación fortuita de otros factores técnicos, referidos tanto al material utilizado como al método particular empleado (Birk y Lawson, 1999; Peckham, 1993; Vitz, 2000). Este hecho se pone claramente de manifiesto cuando se emplean recipientes de la misma altura y distinta sección, comprobándose que el porcentaje de disminución del volumen final ocupado por los gases es menor en los recipientes de mayor volumen (la altura a la que sube el agua decrece con el volumen del recipiente) (Tomás-Serrano y García-Molina, 2023). Por todo ello, varios autores (Lawson et al., 1999; Riveros et al., 2000; Vera et al., 2011) han criticado los distintos modos empleados para

pretendidamente medir el porcentaje del oxígeno en el aire empleando una reacción de combustión.

Estudio de los cambios de cantidad de sustancia en la reacción de combustión

Antes de discutir los cambios físicos que ocurren en estos dos experimentos, nos vamos a centrar en un análisis más detallado, focalizado en la reacción química que tienen lugar. Para mayor semejanza entre los dos experimentos, en ambos casos se asumirá que el proceso se inicia con una vela ardiendo.

Con el propósito de simplificar la discusión, aceptaremos que la vela está constituida por parafina ($C_{25}H_{52}$) y que en el primer experimento se puede despreciar la cantidad de vapor de agua que se aporta por la evaporación del agua de la base a la temperatura inicial de trabajo (la presión del vapor del agua, a 20 °C, es de 17,5 mmHg). También admitiremos que los únicos productos de reacción son el dióxido de carbono y el vapor de agua. De esta forma, la reacción de combustión que tiene lugar se puede representar por la ecuación 1:



Como fácilmente se aprecia de la interpretación de esta ecuación química, las cantidades de sustancia de los gases que corresponden a los productos de reacción son superiores a las de los reactivos. Si se considerara únicamente este aumento, en ambas situaciones la presión en el interior de la vasija debería aumentar, en lugar de disminuir, con lo que el nivel del agua nunca podría subir en el caso del primer experimento (Birk y Lawson, 1999; Lawson et al., 1999); en la segunda investigación, el huevo no sería succionado hacia el interior del recipiente.

Posible disolución del $CO_2(g)$ en el agua y condensación del vapor de agua

De forma análoga a la discusión precedente, se pueden discutir teóricamente otros posibles casos en términos de las variaciones de cantidad de sustancia de los gases, referidos a la posible combustión total del oxígeno y a la eliminación del dióxido de carbono de la mezcla gaseosa por su disolución en el agua, así como la condensación del vapor de agua (Birk y Lawson, 1999; Lawson et al., 1999).

En primer lugar, cabría también preguntarse si, en el caso del primer experimento, el dióxido de carbono producido se disuelve en el agua de la base, lo que contribuiría a la reducción de la presión en el interior del recipiente. A pesar de que este gas presenta una cierta solubilidad en agua en condiciones ambientales, el tiempo tan escaso de contacto de esta sustancia con la superficie del agua hace que la cantidad disuelta sea insignificante (Birk y Lawson, 1999; Caplan et al., 1994; Peckham, 1993; Tomás-Serrano y García-Molina, 2023). En el caso del experimento del huevo duro, de ninguna manera existe esta posibilidad.

Por el contrario, la condensación final del agua sí que tiene relevancia. La cantidad de vapor de agua que finalmente condensa en las paredes del recipiente, por reducción brusca final de la temperatura, resulta un factor que contribuye en alguna medida a la disminución de la presión en su interior. Si condensa todo el vapor de agua formado, se produce una disminución de la cantidad de sustancia total, ya que la cantidad de dióxido de carbono formada es menor que la de oxígeno que ha reaccionado.

De todas formas, se debe hacer hincapié en que la cantidad de vapor de agua formada es mucho menor que la que supone la combustión completa del oxígeno presente.

Otros procesos físicos debidos a variaciones de la temperatura

Hasta ahora, la discusión sólo se ha centrado en las sustancias que intervienen en la reacción de combustión, por lo que no se ha tenido en cuenta que este proceso es fuertemente exotérmico, lo que produce un considerable aumento de temperatura, que puede superar los 800 °C en la zona de la llama. La expansión de la mezcla gaseosa debido a este repentino calentamiento hace que una parte de los gases salgan del recipiente de reacción. Finalmente, cuando la reacción de combustión cesa, los gases que han quedado en su interior se enfrían bruscamente, ocasionando la disminución de presión, lo que explica en buena medida los fenómenos observados.

En el caso del primer experimento, la salida de gases la podemos descomponer en dos fases. En primer lugar, cuando se está tapando la vela, una parte del aire caliente escapa del interior del vaso invertido. Posteriormente, cuando la vela encendida ya está tapada, se observan unas burbujas en la base de agua que corresponden a la salida de una cierta cantidad de la mezcla gaseosa. En el caso del experimento del huevo duro, se puede apreciar cómo inicialmente ‘salta’ ligeramente de forma repetida sobre la boca del matraz debido a la expansión de los gases que salen de su interior.

Debemos insistir en que estas disminuciones de las cantidades de sustancia de la mezcla gaseosa por su salida de la vasija, unidas a los distintos cambios de temperatura que se producen, son cruciales a la hora de explicar estos dos procesos.

Resumen explicativo de los fenómenos observados

Podemos concluir que los cambios de cantidad de sustancia, referidos exclusivamente a la reacción parcial del oxígeno y la formación de dióxido de carbono y de vapor de agua en la reacción química referida, no tienen prácticamente ningún efecto sobre los cambios de presión que explican los hechos observados (Krnel y Glažar, 2001; Vera et al., 2011).

Por el contrario, los fenómenos físicos que tienen lugar sí que son responsables de estas variaciones. En concreto, el aumento de temperatura inicial origina una pérdida de parte de la mezcla gaseosa y el enfriamiento final ocasiona una disminución de la presión de los gases presentes, que en cierta medida se favorece por la condensación de parte del vapor de agua formado en la reacción (Clark, 2009; DeLorenzo, 1996; Glanz, 1963; Obendrauf, 1997).

Actividades de indagación guiada con reducción de la carga cognitiva

Las principales dificultades que presenta el alumnado a la hora de explicar los dos experimentos referidos, así como las consideraciones realizadas previamente para acotar los aspectos relevantes a tener en cuenta, se deben tener presentes para intentar evitar que los estudiantes empleen los razonamientos erróneos observados. Con este objetivo, a continuación se propone una serie de actividades prácticas simplificadas que pretenden servir de base para facilitar al profesorado el diseño (Guisasola et al., 2021) y el desarrollo en el aula de las correspondientes secuencias de enseñanza-aprendizaje, basadas principalmente en la demanda que los conceptos que se trabajan tienen para el alumnado (Leach y Scott, 2002).

Las actividades prácticas que se presentan a continuación se proponen como procesos de indagación dialógica (Hofstein et al., 2013). Estas ayudas discursivas instruccionales (Tang, 2021) representan nuevas herramientas cognitivas para el alumnado, que pueden facilitarle la superación de sus explicaciones causales iniciales.

Los experimentos previos de laboratorio que se proponen suponen una disminución inicial de la carga cognitiva para los estudiantes y pretenden que su discusión les facilite

finalmente salvar su tendencia a la focalización exclusiva en causas inmediatas y visibles (en nuestro caso, la reacción de combustión). Este contexto de aprendizaje asume (Hmelo-Silver y Pfeffer, 2004) que la superación de estas formas de razonamiento superficiales va a permitir al alumnado la consideración de elementos conceptuales clave interrelacionados (inicialmente menos evidentes), lo que va a propiciar la comprensión y la adecuada explicación causal de los dos fenómenos estudiados en este trabajo.

Obtención de resultados semejantes, sin una reacción de combustión como contexto de indagación

La correcta interpretación de los dos experimentos referidos supone una gran exigencia conceptual para el alumnado, particularmente el de secundaria obligatoria. La presencia de la reacción de combustión estaría impidiendo a los estudiantes la consideración de los fenómenos físicos que explican los hechos observados. Por ello, convendría realizar un control de las principales variables implicadas para facilitar finalmente su comprensión. Esta simplificación implica conseguir resultados equiparables, pero sin la participación de una reacción química.

Como alternativa, en el primer experimento, sin la presencia de la vela encendida, se consigue que el agua ascienda hasta una cierta altura en un matraz que previamente se ha calentado (Krnel y Glažar, 2001). Si el matraz caliente se coloca de forma invertida en un recipiente con agua, ésta sube por acción exterior de la presión atmosférica a medida que el aire que queda en su interior se enfría. Este experimento sirve de excelente medio para focalizar las argumentaciones de los alumnos en el cambio de presión que tiene lugar debido tanto a las variaciones de cantidad de sustancia (expansión de los gases y salida del recipiente) como a las variaciones de temperatura producidas mediante el calentamiento inicial y el enfriamiento final (Mete, 2023).

Se puede proponer que el alumnado prediga si existirá algún cambio en la altura del agua en función de la temperatura a la que se ha calentado el aire que contiene el matraz abierto. La hipótesis plausible es que cuanto más se caliente el matraz, no sólo se producirá una mayor diferencia de temperatura sino que además la cantidad de los gases que escaparán del recipiente aumentará, por lo que la altura final del agua será mayor (Figura 2).



Figura 2. Diferente ascenso del agua en dos recipientes idénticos en los que el aire del interior ha sido calentado a diferentes temperaturas: $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (izquierda); $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (derecha).

De forma análoga, se puede conseguir que el huevo entre en el matraz calentando este recipiente previamente. Una vez ubicado el huevo duro en su boca, se coloca el matraz caliente en una cubeta con hielo. El enfriamiento brusco del aire presente hace que el huevo se introduzca de forma similar a como lo hace cuando se quema el trozo de papel (Markow, 1980). De forma alternativa, sin necesidad de calentar el matraz, se puede conseguir el mismo resultado introduciendo el conjunto en un congelador (Adcock, 1998). Otra posibilidad, en lugar utilizar del huevo duro, consiste en emplear un plátano pelado parcialmente (Loeschnig, 2005).

Para reforzar este experimento simplificado se puede solicitar al alumnado que intente sacar el huevo sin romperlo (Leite y Afonso, 2004) para emplearlo de nuevo en la repetición del experimento. Una vez invertido el matraz de forma que el huevo se ubique tapando su boca, se puede conseguir aumentar la presión en su interior calentando de nuevo el matraz, con lo que el huevo termina saliendo (Markow, 1980). Otras formas menos evidentes para el alumnado de incrementar la presión en el interior del matraz para extraer intacto el huevo suponen bien soplar con intensidad en la boca del matraz invertido (Arrigoni, 1975) o bien añadir en su interior una cucharada de bicarbonato y una pequeña cantidad de vinagre (Kolb et al., 1995), con agitación, de forma que la presión ejercida por el dióxido de carbono formado termina extrayendo el huevo del matraz cuando éste se pone con la boca hacia abajo.

La demostración que implica la condensación del vapor de agua por reducción brusca de la temperatura es otro experimento espectacular que se puede aprovechar para ayudar en la comprensión de los dos experimentos, ya que, como hemos indicado, este cambio de estado es un factor a tener en cuenta para su completa interpretación.

Este tipo de actividades prácticas, muchas de ellas de visualización libre en internet, se suelen realizar para poner de manifiesto la existencia de la presión atmosférica (Slisko, 2017). Uno de estos vídeos consiste en el calentamiento hasta ebullición de una pequeña cantidad de agua contenida en un bidón metálico. Cuando este recipiente cerrado se enfría bruscamente al colocarse encima de una cubeta que contiene hielo, se produce su aplastamiento por la acción exterior de la presión del aire al condensar el vapor de agua inicialmente contenido en su interior. Este experimento se suele realizar en contextos escolares empleando una lata de un refresco (Stewart, 1991). Para evitar confusiones, es muy importante que los estudiantes diferencien el papel que desempeña la condensación del vapor de agua en estos experimentos. En el caso de la lata que implosiona, el vapor producido por la ebullición del agua, contenida en la lata, desplaza la mayor parte del aire del interior del recipiente. Por este motivo, la reducción de presión que ocurre al condensar el vapor de agua es mucho mayor que la que ocurre en el experimento del vaso con agua y la vela (o el del huevo que entra al matraz). De hecho, es el factor que determina el aplastamiento de la lata de refresco. En cambio, en los dos experimentos analizados en este estudio, la condensación del vapor de agua producido en la combustión tiene un efecto mucho menor.

Una variación interesante de esta demostración para nuestro propósito consiste en emplear un recipiente de vidrio o de polietileno, lleno con vapor de agua (Gratton y Oss, 2006). Al invertirlo sobre una cubeta con agua fría, el agua sube, llegando a ocupar una gran parte del volumen de la vasija, ya que, de forma análoga, la condensación del vapor de agua producido ocasiona una depresión en su interior (Figura 3).

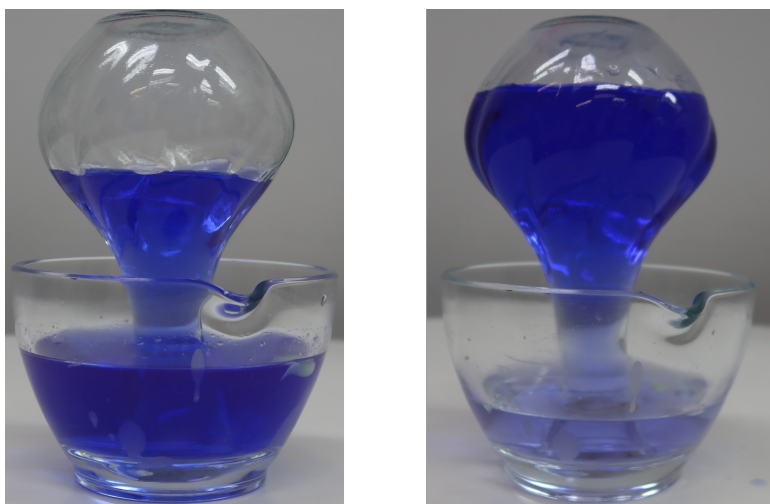


Figura 3. Comparación del volumen de agua que entra en una misma vasija, al invertirla sobre un recipiente con agua fría, que contiene inicialmente, a la misma temperatura: aire caliente (izquierda); vapor de agua (derecha).

Indagación sobre el dióxido de carbono en el experimento de la vela y la cubeta con agua

Stocklmayer (1988) ya propuso realizar el experimento de la cubeta con agua y la vela empleando varias velas de diferente altura, en lugar de una. Las velas no se apagan todas a la vez, como cabría esperar de la hipótesis de la reacción completa del oxígeno presente. Se apagan progresivamente en función de la altura (Peckham, 1993; Que et al., 2020).

La explicación de esta progresión se puede realizar por la combinación de dos fenómenos (Que et al., 2020). Por un lado, el dióxido de carbono formado está más caliente que el aire, por lo que asciende y ocupa la parte superior. A medida que se va formando más cantidad de este gas y va descendiendo, las velas se van apagando, siendo la de menor altura la que se extingue en último lugar. Este aumento progresivo de la cantidad de dióxido de carbono en la zona de la llama de cada vela, unido a la disminución de la concentración de oxígeno, dificulta la combustión, por lo que la temperatura disminuye hasta que llega un valor en el que ya no se puede proporcionar la energía suficiente para superar la energía de activación del proceso. Aunque todavía queda sin reaccionar aproximadamente dos terceras partes del oxígeno inicial, la llama se extingue debido a este factor cinético (Vitz, 2000; MacNeil y Volaric, 2003).

Por último, la lenta disolución del dióxido de carbono en el agua se puede comprobar empleando dos matraces invertidos que contienen este gas en su interior. Si se apoyan sobre sendas cubetas que contienen agua y una disolución saturada de hidróxido de calcio, el agua sólo sube de forma inmediata en este segundo caso, ya que el dióxido de carbono reacciona rápidamente con el Ca(OH)_2 (Obendrauf, 1997) (esta reacción se aprecia fácilmente por la turbidez que aparece debido a la formación de $\text{CaCO}_3(\text{s})$). Por su parte, en el otro recipiente deben pasar varias horas para observar el efecto de la subida del agua por la lentitud con la que se disuelve el dióxido de carbono (Birk y Lawson, 1999; Caplan et al., 1994; Clark, 2009). De esta forma, se ayuda a desechar la hipótesis de que la disminución de la presión en el interior de la vasija se debe en parte a la disolución del dióxido de carbono en el agua.

Etapas final y ampliación del experimento de la vela sobre una cubeta con agua

La discusión anterior propone una serie de experimentos previos con el propósito de ayudar a los estudiantes a considerar los conocimientos relevantes que permiten explicar el experimento de la vela sobre una cubeta con agua y el de la succión del huevo cocido.

Esta transferencia explicativa de ideas se puede reforzar cuando en el primer experimento se comparen los resultados que se obtienen empleando una sola vela con los que corresponden a dos idénticas (Leite y Afonso, 2004; Stocklmayer, 1988). Cuanto mayor sea el número de velas, mayor será la temperatura a la que se calienta la mezcla gaseosa, por lo que la expansión de los gases será mayor, lo que se traducirá en que la altura a la que sube el agua sea mayor (Figura 4).

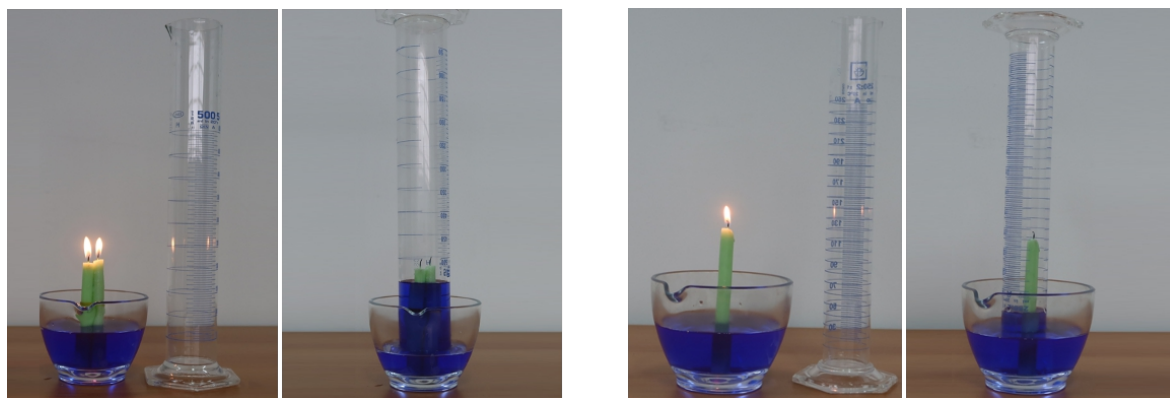


Figura 4. Cuando se emplean dos velas (izquierda), la altura final del agua en la probeta es mayor que cuando se utiliza una vela (derecha).

Conclusiones, limitaciones y sugerencias

Este trabajo ha analizado la complejidad que tiene la comprensión de dos fenómenos semejantes debido a que la reacción de combustión que interviene dificulta la consideración de los cambios físicos relevantes para su explicación. En concreto, se ha estudiado: a) la subida del nivel de agua cuando una vela se apaga en el interior de un recipiente invertido sobre una cubeta que contiene agua; b) la entrada de un huevo duro en un matraz cuando cesa una reacción de combustión en su interior. Dado que en 3º de ESO (Quílez, 2024a) se estudia tanto el comportamiento físico de los gases como las reacciones de combustión, en principio estos dos experimentos resultarían idóneos para ser trabajados inicialmente en este nivel.

Los razonamientos erróneos, que tradicionalmente se han realizado en su explicación, tienen como argumento principal la reacción completa del oxígeno presente. Esta idea es la que normalmente utilizan los estudiantes de distinto nivel académico (incluso licenciados en química y en física) cuando tratan de justificar los hechos observados. Lamentablemente, esta explicación incorrecta también ha estado presente en libros de texto e incluso en artículos de investigación educativa. A esta indeseable situación se añade que todavía se puede encontrar esta justificación en diferentes sitios educativos de internet (A tang of science, 2021; Rhet, 2020), incluso en páginas que corresponden a organismos oficiales de química (American Chemical Society, 2024).

Con el objetivo de disminuir la dificultad que posee el entendimiento de estos dos procesos, se ha propuesto un conjunto de actividades prácticas para simplificar y graduar su estudio. Esta simplificación trata de disminuir la alta demanda cognitiva que presentan por las múltiples variables que se deben considerar. Los procesos físicos que tienen lugar son los verdaderamente significativos a la hora de entender lo que ocurre en cada caso,

pero la fijación en la reacción de combustión impide a los estudiantes utilizar un razonamiento basado en otros aspectos teóricos que ya han estudiado previamente.

Ya que los dos experimentos analizados en este trabajo son muy semejantes, su estudio progresivo (mediante actividades prácticas más sencillas que requieren una menor carga cognitiva) se complementa perfectamente, sirviendo de refuerzo entre sí, así como de medio potencialmente idóneo para que el alumnado ponga a prueba sus ideas, argumente científicamente y finalmente realice la transferencia e integración de ideas.

Sin embargo, de ninguna manera, esta propuesta pretende resolver todos los problemas didácticos que existen para la correcta interpretación de los dos experimentos señalados. En primer lugar, se precisa que cada profesor diseñe su propia secuencia de actividades para el contexto y el nivel de enseñanza que corresponda, en función de la discusión general realizada en este estudio. Dentro de esta planificación de aprendizaje, habría que considerar, además, las ideas iniciales de los alumnos acerca de lo que entienden por una reacción de combustión y cómo este concepto lo van construyendo progresivamente (Andersson, 1990; Gabel et al., 2001; Meheut et al., 1985; Prieto et al., 1992; Watson et al., 1995, 1997). También se deberían tener en cuenta sus ideas iniciales sobre el estado gaseoso y la idea de presión atmosférica (Driver et al., 1989; Mete, 2023; Slisko, 2017). No menos importante resulta la consideración del papel de los modelos en la explicación de los fenómenos físicos que corresponden al comportamiento de los gases (Harrison y Treagust, 2002; Tsaparlis y Sevirian, 2013).

A estos problemas de tipo conceptual habría que añadir las dificultades metodológicas que presenta el alumnado por su empleo de un razonamiento causal lineal (Perkins y Grotner, 2005; Pozo y Gómez-Crespo, 1998), asociado a un patrón de reducción funcional de variables en la resolución de problemas cualitativos. Esta estrategia general produce explicaciones incorrectas y se enmarca en las reglas simples de inferencia que normalmente los estudiantes emplean en el intento de explicación de sistemas complejos de química (Furió y Calatayud, 1996; Quílez, 1997) y de física (Utges y Welti, 2006; Viennot y Rozier, 1994).

Finalmente, dentro de este marco educativo tan complicado, quedaría pendiente conocer, mediante un estudio empírico, en qué grado las actividades propuestas permiten mejorar los argumentos de los estudiantes cuando, al final del proceso planteado, intenten explicar los dos fenómenos en su contexto habitual de la reacción de combustión que tiene lugar.

Por último, si bien en este trabajo se propone que las distintas actividades prácticas se realicen en un ambiente de indagación dialógica entre el profesor y su alumnado, la complejidad cognitiva que presentan deja pendiente comprobar qué grado de orientación es más efectivo en este tipo de intervención, dado el actual debate sobre cuándo y cómo realizar una instrucción directa (Ashman et al., 2020; de Jong et al., 2023; Sweller et al., 2024; Zhang et al., 2022; Zhang y Sweller, 2024). En cualquier caso, cualquier innovación educativa que se pretenda realizar en este sentido debería considerar unos parámetros mínimos de rigor y de calidad educativas (Quílez, 2024b).

Referencias

- A tang of science (2021). *Candle Experiment*. <https://tangofscience.blog/2021/01/22/candle-experiment/>
- Adcock, L. H. (1998). The Egg in the Bottle Revisited: Air Pressure and Amontons' Law (Charles' Law). *Journal of Chemical Education*, 75(12), 1567–1568. <https://doi.org/10.1021/ed075p1567>

- American Chemical Society (2024). *Flame out*. <https://www.acs.org/education/whatischemistry/adventures-in-chemistry/experiments/flame-out.html>
- Anderson, J. R. (2010). *Cognitive Psychology and its Implications*. Worth Publishers.
- Andersson, B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18(1), 53-85. <https://doi.org/10.1080/03057269008559981>
- Arrigoni, E. (1975). Some Egg-Citing Experiments for Easter. *The Science Teacher*, 42(2), 51-53. <https://www.jstor.org/stable/24125833>
- Ashman, G., Kalyuga, S. y Sweller, J. (2020). Problem-solving or explicit instruction: Which should go first when element interactivity is high? *Educational Psychology Review*, 32, 229–247. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09500-5>
- Birk, J. P. y Lawson, A. E. (1999). The persistence of the candle-and-cylinder misconception. *Journal of Chemical Education*, 76(7), 914–916. <https://doi.org/10.1021/ed076p914>
- Caplan, J. B., Gerritsen, H. J. y LeDell, J. S. (1994). The hidden complexities of a “simple” experiment. *Physics Teacher*, 32(5), 310–314. <https://doi.org/10.1119/1.2344010>
- Carrascosa, J. y Gil, D. (1985). La «metodología de la superficialidad» y el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 113-120. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5246>
- Clark, S. K. (2009). A Brief Note on Misconceptions Regarding the Candle-and-Tumbler Experiment. *Journal of Geoscience Education*, 57(2), 99-100.
- de Jong, T., Lazonder, A. W., Chinn, C. A., Fischer, F., Gobert, J., Hmelo-Silver, C. E., Koedinger, K. R., Krajcik, J. S., Kyza, E. A., Linn, M. C., Pedaste, M., Scheiter, K. y Zacharia, Z. C. (2023). Let's talk evidence—The case for combining inquiry-based and direct instruction. *Educational Research Review*, 39, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2023.100536>
- DeLorenzo, R. (1996). Egg in the bottle. *Journal of Chemical Education*, 73(9), A188.
- Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien. *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Morata. 1989.
- Furió, C. y Calatayud, M. L. (1996). Difficulties with the geometry and polarity of molecules. Beyond Misconceptions. *Journal of Chemical Education*, 73(1), 36-41. <https://doi.org/10.1021/ed073p36>
- Gabel, D. L., Stockton, J. D., Monaghan, D. L. y MaKinster J. G. (2001). Changing Children's Conceptions of Burning. *School Science Review*, 101(8), 439–451. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2001.tb17879.x>
- García-Rodeja, I.; Sesto, V. (2016). ¿Por qué sube el agua? Un estudio comparativo del desempeño en el uso de pruebas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 2015-229. <http://hdl.handle.net/10498/18285>
- Gericke, N., Högström, P. y Wallin, J. (2022) A systematic review of research on laboratory work in secondary school. *Studies in Science Education*, 59(2), 245-285. <https://doi.org/10.1080/03057267.2022.2090125>

- Guisasola, J., Ametller, J., y Zuza, K. (2021). Investigación basada en el diseño de Secuencias de Enseñanza-Aprendizaje: una línea de investigación emergente en Enseñanza de las Ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1). 1801. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1801
- Glanz, J. (1963). Oxygen in air. *Journal of Chemical Education*, 40(6), A477.
- González, M. E., Artigue, B., Lozano, M. T., Markina, M. C. y Mendizábal, A. (2013). 84 experimentos de química cotidiana en secundaria. Graó.
- Gratton, L. M. y Oss, S. (2006). An extension of the imploding can demonstration. *The Physics Teacher*, 44, 269–271. <https://doi.org/10.1119/1.3393054>
- Harrison, A. G. y Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: challenges in understanding the submicroscopic world. En de Jong, O., Justi, R., Treagust, D. F. y van Driel, J. H. (Eds.). *Chemical education: towards research-based practice* (pp. 189–212). Kluwer.
- Hmelo-Silver, C. y Pfeffer, M. G. (2004). Comparing expert and novice understanding of a complex system from the perspective of structures, behaviours and functions. *Cognitive Science*, 28, 127-138. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(03\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(03)00065-X)
- Hofstein, A., Kipnis, M. y Abrahams, P. (2013). How to learn in and from the chemistry laboratory. En Eilks, I. y Hofstein, A. (Eds.). *Teaching Chemistry – A Studybook* (pp. 153 – 182). Sense.
- Hubbard, D. E. (2017). Chemical Lecture Demonstrations: An Opportunity for Engagement through Collections, Instruction, and Reference. *Science & Technology Libraries*, 36(4), 376-389. <https://doi.org/10.1080/0194262X.2017.1389667>
- Katchevich, D., Hofstein, A. y Mamlok-Naaman, R. (2013). Argumentation in the chemistry laboratory: Inquiry and confirmatory experiments. *Research in Science Education*, 43(1), 317–345. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9267-9>
- Kim, M., Joung, Y. J. y Yoon, H. G. (2012). Stories of Teaching Hypothesis – Verification Process in Elementary Science Classrooms. En K. C. D. Tan y M. Kim (eds.), *Issues and Challenges in Science Education Research* (pp. 175-189). Springer.
- Kolb, D., Grzanich, S., Carrigan, P. (1995). Getting the Egg Out of the Bottle. *Journal of Chemical Education*, 72(6), 527.
- Kovacs, T. A. (2008). Weather and Climate Course Design for Education Majors with and without Science Majors. *Journal of Geoscience Education*, 56(5), 440-444.
- Krnel, D. y Glažar, S. A. (2001). "Experiment with a Candle" without a Candle. *Journal of Chemical Education*, 78(7), 914. <https://doi.org/10.1021/ed078p914>
- Lawson, A. E., Lewis, C. M. y Birk, J. P. (1999). Why do students “cook” data? *Journal of College Science Teaching*, 30, 191-198.
- Leach, J. y Scott P. (2002). Designing and Evaluating Science Teaching Sequences: An Approach Drawing upon the Concept of Learning Demand and a Social Constructivist Perspective on Learning. *Studies in Science Education*, 38, 115-142. <https://doi.org/10.1080/03057260208560189>

- Leite, L. y Afonso, A. (2004). Forms of reasoning used by prospective physical sciences teachers when explaining and predicting natural phenomena. *Canadian Journal of Science Mathematics and Technology Education*, 4, 169–191. <https://doi.org/10.1080/14926150409556604>
- Loeschnig, L. V. (2005). *Chemistry experiments*. Sterling Publishing.
- Lucas, A. M. y García-Rodeja, I. (1989). Contra las interpretaciones simplistas de los resultados de los experimentos realizados en el aula. *Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), 11-6. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/51286>
- MacNeil, J. y Volaric, L. (2003). Incomplete Combustion with Candle Flames: A Guided-Inquiry Experiment in the First-Year Chemistry Lab. *Journal of Chemical Education*, 80(3), 302–304. <https://doi.org/10.1021/ed080p302>
- Markow, P. G. (1980). A Charles' Law Demonstration Rehatched. *Journal of Chemical Education*, 57(4), 307.
- Meheut, M. (1985). Pupils' (11–12 year olds) conceptions of combustion. *European Journal of Science Education*, 7(1), 83–93. <https://doi.org/10.1080/0140528850070109>
- Mete, P. (2023). Argumentation Skills of Pre-Service Elementary Teachers on Atmospheric Pressure. *Journal of Science Learning*, 6(1), 100-116. <https://doi.org/10.17509/jsl.v6i1.46644>
- Moran, M. (1996). Egg in the bottle. *Journal of Chemical Education*, 73(9), A189.
- Obendrauf, V. (1997). Egg in the bottle revisited. *Journal of Chemical Education*, 74(12), 1396.
- Peckham, G. (1993). A new use for the candle and tumbler myth. *Journal of Chemical Education*, 70(12), 1008–1009. <https://doi.org/10.1021/ed070p1008>
- Perkins D. N. y Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of Causal Understanding: the Role of Complex Causal Models in Students' Understanding of Science. *Studies in Science Education*, 41(1), 117-165. <https://doi.org/10.1080/03057260508560216>
- Pozo, J. I., Gómez-Crespo, M. A., Limón, M. y Sanz-Serrano, A. (1991). *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia: las ideas de los adolescentes sobre química*. CIDE.
- Pozo, J. I. y Gómez-Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Morata.
- Prieto, T., Watson, R. y Dillon, J. (1992). Pupils' understanding of combustion. *Research in Science Education*, 22, 331-340. <https://doi.org/10.1007/BF02356913>
- Proksa, M., Krizanova, M., Drozdikova, A. y Halakova, Z. (2023). Experiences with Student Projects Focusing on Chemistry Shows in Undergraduate Chemistry Teacher Education. *Journal of Chemical Education*, 100(9), 3494–3499. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00531>
- Que, R., Sha, S., Shen, L. y Xiong, Y. (2020). Changes of CO₂ concentration and heat illustrate why the flame is extinguished in the candle- and cylinder experiment. *Journal of Chemical Education*, 97(4), 1195–1197. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00833>

- Quílez, J. (1997). El principio de Le Châtelier: un obstáculo epistemológico en el aprendizaje del equilibrio químico. *Infancia y Aprendizaje*, 20(78), 73-86. <https://doi.org/10.1174/021037097761403154>
- Quílez, J. (2024a). Análisis epistemológico del currículum LOMLOE de Química de la ESO de la Comunitat Valenciana. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 21(2), 3304. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i2.2304
- Quílez, J. (2024b). Sobre la innovación educativa en la enseñanza de la química en las universidades españolas. *Anales de Química RSEQ*, 120, 61-66. <https://doi.org/10.62534/rseq.aq.1977>
- Rhet, A. (2020). How does this candle suck up water into a glass? <https://rjallain.medium.com/how-does-this-candle-suck-water-up-into-a-glass-f8cb3bef33b9>
- Riveros, H.G., Ovalle-Marroquín, P. y Lara, A. (2000). Oxygen measurement in gas mixtures. *Revista de la Sociedad Química de México*, 44(2), 101-103.
- Riveros, H. G. (2012). Popular Explanations of Physical Phenomena: Broken Ruler, Oxygen in the Air and Water Attracted by Electric Charges. *European Journal of Physics Education*, 3(2), 52-57. <http://eu-journal.org/index.php/EJPE/article/view/111>
- Rozier, S. y Viennot, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13(2), 159-170. <https://doi.org/10.1080/0950069910130203>
- Science World Society (2024). Egg in a bottle. <https://www.scienceworld.ca/resource/egg-bottle/>
- Shakhashiri, B. Z. (1985). *Chemical Demonstrations: A Handbook for Teachers of Chemistry*. Vol. 2. University Wisconsin Press.
- Shamos, M. S. (1975). Egg in the milk bottle caper. *The Science Teacher*, 42(7), 59. <https://www.jstor.org/stable/24125806>
- Slisko, J. (2017). What did first-year students of physics learn previously about experiments that show existence of atmospheric pressure. *Latin American Journal of Physics Education*, 11(3), 3309.
- Steward, J. E. (1991). The Collapsing Can Revisited. *The Physics Teacher*, 29(3), 141
- Stocklmayer, S. (1988). Casting a little light on some candle experiments. *The Australian Science Teachers' Journal*, 34(3), 39-40.
- Sweller, J., Zhang, L., Ashman, G., Cobern, W. y Kirschner, P. A. (2024). Response to de Jong et al.'s (2023) paper "Let's talk evidence – The case for combining inquiry-based and direct instruction". *Educational Research Review*, 42, 100584. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2023.100584>
- Tang, K. S. (2021). *Discourse strategies for science teaching & learning: Research and practice*. Routledge.
- Thayer, J. W. (1975). Egg in the milk bottle caper. *The Science Teacher*, 42(7), 60. <https://www.jstor.org/stable/24125806>

- Tomás-Serrano, A. y García-Molina, R. (2015). *Experimentos de Física y Química en tiempos de crisis*. Universidad de Murcia.
- Tomás-Serrano, A. y García-Molina, R. (2023). Una contribución para dilucidar las principales causas de ascenso de agua en un vaso invertido sobre la llama de una vela. *Anales de Química de la RSEQ*, 119(2), 180-188. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1884>
- Tsaparlis, G. y Sevan, H. (2013). *Concepts of matter in science education*. Springer.
- Unesco (1982). *Nuevo manual de la Unesco para la enseñanza de las ciencias*. Edhasa.
- Utges, G. y Welti, R. (2006). La reducción funcional en la justificación de la adiabaticidad de las ondas sonoras. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(2), 185-192. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/75825>
- Vera, F., Rivera, R. y Núñez, C. (2011). Burning a Candle in a Vessel, a Simple Experiment with a Long History. *Science & Education*, 20(9), 881-893. <https://doi.org/10.1007/s11191-011-9337-4>
- Viennot, L. y Rozier, S. (1994). Pedagogical Outcomes of Research Education: Examples in Mechanics and Thermodynamics. En Fensham, P., Gunstone, R. y White, R. (Eds.). *The Content of Science* (pp. 237-254). The Falmer Press.
- Vitz, E. (2000). Paradoxes, puzzles, and pitfalls of incomplete combustion demonstrations. *Journal of Chemical Education*, 77(8), 1011–1013. <https://doi.org/10.1021/ed077p1011>
- Watson, R., Prieto, T. y Dillon, J. (1995). The effect of practical work on students' understanding of combustion. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 487-502. <https://doi.org/10.1002/tea.3660320506>
- Watson, R., Prieto, T. y Dillon, J. (1997). Consistency in students' explanations about combustion. *Science Education*, 81, 425-444. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199707\)81:4%3C425::AID-SCE4%3E3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4%3C425::AID-SCE4%3E3.0.CO;2-E)
- Yoon, HG., Joung, Y. J. y Kim, M. (2012). The Challenges of Science Inquiry Teaching for Pre-Service Teachers in Elementary Classrooms: Difficulties on and under the Scene. *Research in Science Education*, 42, 589–608. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9212-y>
- Zhang, L., Kirschner, P.A., Cobern, W.W. y Sweller, J. (2022). There is an Evidence Crisis in Science Educational Policy. *Educational Psychology Review*, 34, 1157–1176. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09646-1>
- Zhang, L. y Sweller, J. (2024). Instructional sequences in science teaching: considering element interactivity when sequencing inquiry-based investigation activities and explicit instruction. *European Journal of Psychology of Education*. <https://doi.org/10.1007/s10212-024-00799-5>