



¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental

Does the mass of the Earth vary? Modeling through thought experiment

José M^a Oliva
*Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.*

josemaria.oliva@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-2686-6131>

Juan José Vicente Martorell
*Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.*

juanjose.vicente@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7498-0214>

Rosario Franco-Mariscal

IES Castillo de Luna, Rota, Cádiz.

rosario.franco@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-5535-7216>

María del Mar Aragón Méndez
*Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.*

mariadelmar.aragon@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-5997-389X>

Jesús Matos Delgado
*IES Santo Domingo, El Puerto de Santa
María, Cádiz.*

jmatosd@yahoo.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-0770-2641>

Francisco Soto Mancera
*Colegio Británico Sage College,
Jerez de la Frontera, Cádiz.*

francisco.sotomancera@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7974-7470>

Rubén Marín Barrios
IES Huerta del Rosario, Chiclana, Cádiz.

ruben.marin@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-2288-7610>

RESUMEN • El artículo analiza el efecto de la resolución de problemas cualitativos mediante experimentos mentales, en el uso de la idea de conservación de la masa. Se trata de identificar los modelos expresados por los estudiantes y cómo estos se ajustan y autorregulan a partir del trabajo en el aula. Para ello se realiza un estudio de casos múltiples con estudiantes de secundaria obligatoria, empleando métodos cualitativos de análisis de datos. A lo largo del experimento mental, los estudiantes empezaron movilizandolos modelos ingenuos y simples, basados en la no conservación de la materia, y más de la mitad terminó formulando otros que integraban el principio de conservación de la masa y la idea de Tierra como sistema abierto. Ello sugiere el papel de los experimentos mentales como escenarios propicios para favorecer procesos de modelización en ciencias.

PALABRAS CLAVE: Conservación de la masa; Experimentos mentales; Modelos; Modelización; Sistema.

ABSTRACT • This paper analyzes the effect of the resolution of qualitative problems through mental experiments, in the use of the idea of conservation of mass. Its purpose is to identify the models expressed by the students, and how they adjust and self-regulate as a result of the work in the classroom. For this, a multiple case study is carried out with secondary school students, using qualitative methods of data analysis. Throughout the mental experiment, students began mobilizing simple and naive models, based on a non-conservation of matter, while more than half ended up formulating others that spontaneously integrated the principle of conservation of mass and the idea of Earth as an open system. These results show the role of mental experiments as favorable scenarios for modeling in science.

KEYWORDS: Conservation of mass; Mental experiments; Models; Modeling; System.

Recepción: octubre 2019 • Aceptación: enero 2020 • Publicación: junio 2021

Oliva, J. M.^a, Aragón Méndez, M. M., Soto Mancera, F., Vicente Martorell, J. J., Matos Delgado, J., Marín Barrios, R. y Franco-Mariscal, R. (2021). ¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(2), 25-43.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3116>

INTRODUCCIÓN

La noción de materia es una de las grandes ideas de la ciencia, ya que no solo es importante para comprender muchos fenómenos, sino también para el aprendizaje de otras ideas claves para la educación científica (Smith, Wisser, Anderson y Krajcik, 2006). Dicha noción es multifacética, puesto que articula diversas ideas y progresa desde una comprensión fenomenológica hacia otra subatómica (Hadenfeldt, Neumann, Bernholt, Liu y Parchmann, 2016; Morell, Collier, Black y Wilson, 2017). Así, Hadenfeldt, Liu y Neumann (2014) identificaron cuatro dimensiones para ella: estructura y composición, propiedades físicas y cambio, reacción química y conservación; para cada una de las cuales es posible establecer distintos niveles de progresión. Por tanto, la conservación de la masa es uno de los requisitos para la comprensión de la idea de materia y, por ello, para el estudio de la ciencia, en general, y de la química, en particular. De hecho, constituye una de las leyes ponderales y tiene una dimensión que sobrepasa los límites de la química. Así, el principio de conservación de la masa es también considerado como uno de los principios básicos de la física (Bitsakis, 1991; Eriksen y Vojenli, 1976) y, de hecho, Holton y Brush (1988) lo enuncian concerniendo también a los cambios físicos, y no solo a los que implican cambios de composición: «... a pesar de los cambios de posición, forma, aspecto, composición química., etc., la cantidad total de masa contenida en una determinada región permanece constante» (p. 333).

Shayer y Adey (1984), siguiendo a Piaget, sugieren que la conservación de la materia es ya aceptada por los niños desde los primeros estadios de las operaciones concretas, algo que no ocurre con la conservación de la masa, que debe esperar a la culminación de las operaciones concretas o al inicio de las operaciones formales. Pero, a pesar de que dicha noción es reiteradamente estudiada en la escuela, su apropiación resulta incierta, incluso en estudiantes que finalizan secundaria y bachillerato. Esos son capaces de memorizar dicho principio, pero no de comprenderlo ni integrarlo en sus explicaciones (Landau y Lastras, 1996; Oñorbe de la Torre y Sánchez Jiménez, 1992).

Así, al aplicar sus ideas a situaciones cotidianas, movilizan ideas inadecuadas que contradicen el principio de conservación de la masa, sobre todo si las tareas involucradas implican transformaciones químicas (Gómez, Pozo y Sanz, 1995), particularmente si intervienen gases (Stavy, 1990, Furió, Hernández y Harris, 1987). Más aún, el problema se complica ante fenómenos de biología, como el crecimiento de las plantas, donde los estudiantes prestan poca atención a la procedencia y al destino de la materia, al carecer de una visión sistémica del mundo natural que incorpore un modelo de materia y energía a escala atómico-molecular (Dauer, Doherty, Freed y Anderson, 2014; Mohan, Chen y Anderson, 2009).

Por otro lado, una condición de contorno concomitante con la de transformación de la materia es el carácter cerrado o abierto del sistema en el que se produce. Si es cerrado, la conservación de la materia conduce a una invariancia de la masa del sistema, mientras que, si es abierto, puede haber variaciones si se intercambia materia con el exterior. De ahí que sea razonable esperar que la conservación de la masa se construya en íntima conexión con el carácter cerrado o abierto del sistema.

En este artículo se analiza el efecto de la resolución de problemas cualitativos mediante experimentos mentales, en el aprendizaje de la idea de conservación de la masa y la de Tierra como sistema abierto. Se trata de poner a prueba el potencial de los experimentos mentales a la hora de promover escenarios de modelización en ciencias. Para ello, se recurre a un estudio de casos múltiples, en el que una misma actividad se implementa con distintos grupos-clase de estudiantes, para comprobar su utilidad a la hora de movilizar sus modelos de razonamiento en respuesta al problema planteado.

MODELIZACIÓN Y EXPERIMENTOS MENTALES EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

La investigación se sitúa en el marco de la modelización en ciencias, considerando que, cuando alguien se plantea una pregunta, elabora un modelo mental para darle respuesta, que luego evalúa, revisa y modifica en caso necesario (Gobert y Buckley, 2000).

La idea de modelo aparece en la literatura bajo distintas acepciones (Gutiérrez, 2005; Harrison y Treagust, 2000; Oliva, 2019), y en este caso se considera como una representación dirigida a explicar y predecir el comportamiento de un sistema físico-natural (Adúriz-Bravo, 2012; Gilbert, Boulter y Elmer, 2000). Por tanto, los modelos son mediadores entre el mundo real y los conocimientos abstractos (Acevedo-Díaz, García-Carmona, Aragón-Méndez y Oliva-Martínez, 2017; Morrison y Morgan, 1999); y pueden ser considerados como teorías específicas (Bunge, 1973) o teorías en acción.

En la vida diaria y durante su aprendizaje, los alumnos elaboran representaciones de la realidad que tienen para ellos una utilidad semejante a la de los modelos para la ciencia, al elaborarse para comprender y prever el comportamiento de una parte de la realidad (Grosslight et al., 1991). De ahí que se les denomine modelos mentales, que son análogos estructurales del mundo cuyo uso permite a alguien adaptarse a este e interactuar con él (Johnson-Laird, 1996; Vosniadou, 1994).

Los modelos mentales son internos, implícitos y provisionales, y constituyen formas de pensamiento situadas, articuladas y dinámicas (Pozo, 1989; Vosniadou, 1994). Son situadas porque se construyen en contextos específicos. Son articuladas porque se componen de distintas «piezas cognitivas», particularmente de representaciones proposicionales e imágenes (Johnson Laird, 1996), que pueden combinarse o recombinarse de distinta forma (Moreira, Greca y Palmero, 1997). Finalmente, son dinámicas porque cambian con el tiempo, en función de la nueva información y de su contraste con la que se espera del modelo. Estos rasgos están relacionados. Por ejemplo, es el carácter articulado el que permite a los modelos un comportamiento flexible y robusto, y es también el factor que permite su progresión a través de cambios parciales.

Como se ha dicho, los modelos mentales son internos y, por ello, inaccesibles directamente (Gilbert y Boulter, 1995). Son las tareas de aula y los discursos que se entablan en torno a ellas los que permiten obtener información sobre estos, ya que solo podemos inferirlos a través de las explicaciones, argumentos y representaciones simbólicas usadas cuando se movilizan. Se comprende, por ello, el alto grado de confluencia que existe entre los estudios sobre modelización y sobre argumentación en ciencias o construcción de explicaciones (Cardoso Mendonça y Justi, 2013; Gómez Loarces, Fernández Ferrer y González García, 2019; Jiménez-Aleixandre y Puig, 2010; Monteiro y Jiménez-Aleixandre, 2019; Passomore y Svoboda, 2012; Revel Chión y Adúriz-Bravo, 2019), y de ahí que aludamos en este estudio a los argumentos de los estudiantes, como observables que nos aproximan a los modelos empleados. Además, dado que los modelos mentales presentan una estructura articulada, el discurso del alumno ha de ser analizado también en clave de conjunto de argumentos básicos que permiten hilvanar un razonamiento dado.

Para movilizar los modelos de los estudiantes, son diversos los recursos disponibles en la clase de ciencias. En unos casos estos son materiales, como las maquetas; en otros son digitales, como las simulaciones, y en otros subyacen tras el discurso del profesor, como ocurre con las analogías o con los experimentos mentales (Oliva, 2019). En este artículo focalizamos la atención en estos últimos, como instrumentos relevantes para la modelización en ciencias.

Un experimento mental es un experimento que pretende sus objetivos sin necesidad de ejecutarlo materialmente (Sorensen, 1992), para lo que se recurre a experiencias recreadas y controladas mentalmente, con el fin de concluir unos resultados. Se utiliza para probar algo o para persuadir a otros del rechazo de una afirmación (Gilbert y Reiner, 2000); en especial, cuando no es posible realizarlo en la vida real o cuando se trabaja con situaciones imaginarias: viajar sobre una onda, hacer fotografías de

un átomo, etc. En esencia, consiste en una situación hipotética en torno a las que se realizan predicciones usando conocimientos y experiencias anteriores, pero que pueden desembocar en paradojas que amplían el marco conceptual previo (Donati y Andrade-Gamboa, 2004).

En la enseñanza, en unos casos se extraen de experimentos ficticios formulados por científicos en la historia de la ciencia, como ocurre en el caso del diablillo de Maxwell o del gato de Schrödinger. De hecho, los experimentos mentales han jugado un papel importante en la historia de la ciencia (Nersessian, 1999; Sorensen, 1992). En otros, son experimentos que fueron reales, pero que ahora se plantean como experimentos imaginarios, ya que los alumnos han de recrearlos mentalmente a partir de su relato. Por ejemplo, el experimento de Rutherford con partículas alfa o el experimento de Michelson y Morley fueron experimentos reales que hoy se reproducen en las explicaciones de los docentes y de los libros de texto con diversos fines. Finalmente, en otros casos son artefactos creados por quien explica, al objeto de guiar la activación de modelos en los alumnos. Suelen ser situaciones dinámicas o experiencias imaginarias, mediante las que se insta a alguien a imaginar algo para extraer conclusiones: «imagínate qué sucedería si...», «supongamos que... entonces ¿qué pasaría?», etc.

Reiner (1998) y, posteriormente, Reiner y Burko (2003) identificaron las etapas de un experimento mental:

1. La construcción de un escenario imaginario en el que se genera una pregunta que investigar inserta en un modelo teórico.
2. La identificación de los aspectos relevantes del sistema físico manejado, junto a la formulación de una hipótesis que se deriva del modelo.
3. El desarrollo del experimento mental propiamente dicho.
4. El análisis de los resultados de este.
5. La formulación de sus conclusiones.

Es decir, se ha de disponer de un mundo imaginario análogo al mundo real, de una pregunta o problema que resolver y de un modelo que permita hacer inferencias e interpretar sus resultados.

Aunque en principio los experimentos mentales surgieron en la ciencia como construcciones individuales (Nersessian, 1999), han sido usados socialmente dentro de la comunidad científica para negociar ideas y convencer a otros. Del mismo modo, se considera que su uso en el aula puede ayudar en la inmersión de los alumnos en la práctica científica, a través de los debates y diálogos que puede suscitar su uso en el trabajo colaborativo (Reiner, 1998; Reiner y Gilbert, 2000). De hecho, los citados autores apreciaron en sus estudios de aula que las producciones individuales sobre experimentos mentales solían ser caóticas y desestructuradas, pero que, sin embargo, mejoraban cuando se gestaban de forma colectiva, hasta asentarse como verdaderos experimentos mentales (Reiner y Gilbert, 2000). Por tanto, el trabajo en grupo desempeña un papel valioso en este proceso, porque la interacción entre los estudiantes y la argumentación desarrollada por determinados miembros ayudan a otros con dificultades (Velentzas y Halkia, 2013). Esto es, la conversación crea un contexto mental compartido (Cubero, 2001) que posibilita el intercambio de modelos personales entre los miembros de un grupo, y ello da ocasión a que se genere un modelo compartido (Seel, 2017).

A través de los estudios citados se ilustra el papel de los experimentos mentales en la reflexión y el razonamiento científico en el aula, en la comprensión de la ciencia y, en suma, en el aprendizaje de la modelización en ciencias. De hecho, su interés y viabilidad en la enseñanza han sido estudiadas tanto con alumnos universitarios (Reiner, 1998) como de bachillerato (Reiner y Gilbert, 2000; Velentzas y Halkia, 2013), o incluso de secundaria obligatoria (Reiner y Gilbert, 2004). El reto, como profesores, ante escenarios como estos, es ir más allá del mero relato de la experiencia y de sus implicaciones teóricas y proporcionar un foro en el que el alumnado aventure hipótesis y soluciones ante una tarea problemática, en el contexto de un trabajo tanto individual como colectivo.

LA ACTIVIDAD PLANTEADA Y EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El contexto de investigación lo conforma una actividad desarrollada con grupos de estudiantes de Educación Secundaria Obligatoria (2.º y 3.º ESO). Esta consistió en la resolución de un problema cualitativo abierto formulado en el marco de un experimento mental. El problema consistía en determinar si la masa de la Tierra varía o no con el tiempo, para lo que se planteó un enunciado sugerente como el indicado en el cuadro 1. En él se aventura una cifra, supuestamente obtenida en 1930 por el físico americano Paul Heyl, a partir de los valores que obtuvo para la constante de gravitación universal (Heyl, 1930).

Cuadro 1.
Enunciado del problema planteado

En el año 1797, el físico inglés Henry Cavendish logró determinar por primera vez la masa de la Tierra. Uno de los mejores cálculos de la masa de la Tierra deriva de un estudio realizado en 1930 por Paul Heyl, mediante el que se podía concluir que la masa de la Tierra era de:

5.983.426.546.758.231.452.678.762 kg

Este valor aparecía en mi libro de texto de 2.º de ESO, *me gustó el número y me lo aprendí de memoria... ¡cuando yo tenía vuestra edad!*

Dado que la Tierra ha variado mucho desde entonces, nos podemos preguntar si actualmente la masa de la Tierra será igual, mayor o menor que la deducida en 1930, es decir, el número que yo me aprendí de memoria.

La actividad se articuló alrededor de cinco fases, todas ellas desarrolladas a lo largo de una sesión de clase de 60 minutos (figura 1).

La respuesta a la pregunta exige contemplar de forma simultánea la idea de conservación de la masa y la de Tierra como sistema abierto. Debería considerar que, a pesar de los cambios aparentes en el interior y en la superficie terrestres, estos se originan por cambios físicos y químicos en los que se conserva la masa. No obstante, superpuesta a esta idea, se ha de considerar que la masa varía de forma sensible debido al intercambio de materia con el exterior: pérdidas por emisión de gases ligeros como hidrógeno y helio, lanzamiento de satélites al espacio, atracción de polvo cósmico, meteoritos, etc. De forma neta, estos cambios se traducen en una pequeña disminución progresiva de la masa terrestre. Justamente, el objetivo de la actividad era indagar en el significado de la idea de transformación en un sistema, lo cual es básico para entender la conservación de la masa desde un punto de vista químico.

La actividad puede considerarse como un experimento mental, al integrar todos los ingredientes señalados en la literatura (Reiner, 1998; Reiner y Burko, 2003):

- a) La construcción de un escenario que invita a imaginar la Tierra como sistema en el que suceden cambios.
- b) El uso de las ideas iniciales para la formulación de una hipótesis para decidir si la masa de la Tierra varía o no.
- c) La evocación en el imaginario de distintos eventos particulares familiares que pongan a prueba, local y/o globalmente, la hipótesis planteada.
- d) La oportunidad de cotejar las conclusiones obtenidas, a través de otras reflexiones y de otros puntos de vista.

- e) La formulación de conclusiones, en términos de reafirmar la hipótesis de partida o, en su caso, revisarla buscando otra nueva.
- f) La construcción de un modelo final que sirva para interpretar los cambios analizados y hacer predicciones de futuro.

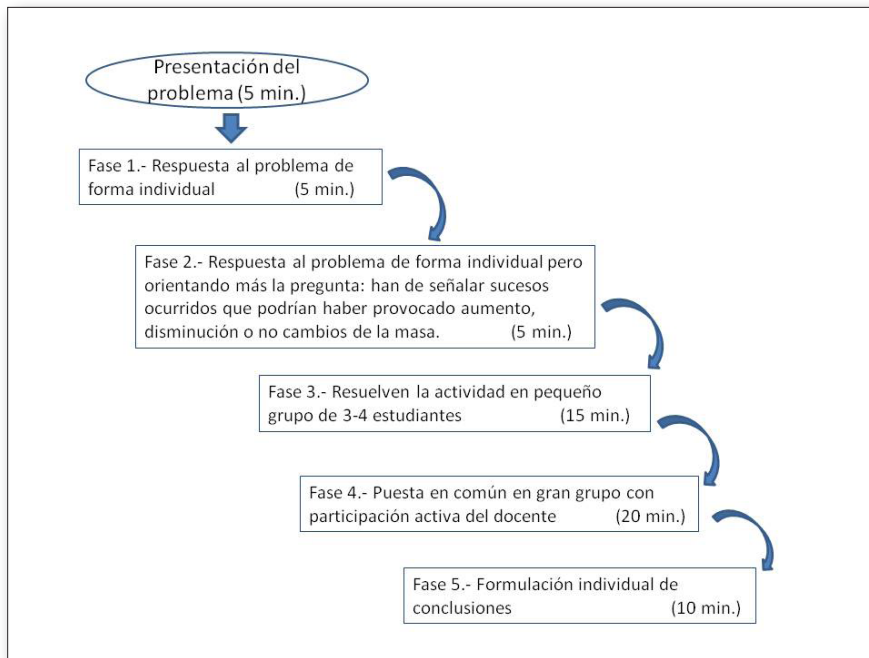


Fig. 1. Distintas fases de la actividad planteada.

El foco de esta investigación se sitúa en el análisis de los modelos usados por los estudiantes a lo largo de la actividad, y en comprobar cómo estos se ajustan y autorregulan como consecuencia del trabajo en el aula y del conjunto de factores intervinientes: adopción de nuevas perspectivas, discusión en grupo, andamiaje del profesor, etc. En concreto, se propusieron las siguientes cuestiones de investigación:

- a) ¿Qué modelos se emplearon en respuesta al problema planteado a lo largo de la actividad?
- b) ¿Qué cambios netos se apreciaron en esos modelos tras finalizar la actividad?

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Se recurrió a un estudio de casos múltiples, uno de ellos con estudiantes de 3.º de ESO (caso A) y otros dos con alumnado de 2.º de ESO (casos B y C). El enfoque de investigación fue de carácter cualitativo, tanto en la forma de recopilar la información como a la hora de analizarla.

Participantes y su contexto

En el estudio de caso A intervinieron 9 estudiantes (5 chicas y 4 chicos) de un grupo-clase de un centro privado británico bilingüe, ubicado en un contexto urbano de una localidad española. En este centro se complementa el currículum británico con Lengua Castellana y Literatura, y Geografía e Historia, para que los alumnos obtengan de forma simultánea la titulación británica y la española. El contexto

de partida fue la asignatura «Chemistry» del curso *year 10* del sistema británico, equivalente a 3.º de ESO. Los alumnos eran de clase media-alta y podrían catalogarse, por término medio, como de buen rendimiento académico. Previamente, los alumnos habían estudiado los siguientes tópicos: estados de la materia y cambios de estado, separación de mezclas, teoría cinética, difusión, átomos, moléculas, elementos y compuestos, y diferencias a nivel macroscópico entre cambio químico y cambio físico. La actividad objeto de análisis se planteó como un nexo de unión entre esos temas y el modelo daltoniano de cambio químico. En cuanto al principio de conservación de la masa, aunque ya se trató en el curso anterior, lo fue de un modo descriptivo. Por su parte, el profesor contaba con tres años de experiencia docente, desarrollados después de haber cursado el Máster de Profesorado de Secundaria. En sus clases, solía usar enfoques metodológicos diversos, pero siempre intentando favorecer la participación del alumnado a través de preguntas, pistas y respuestas parciales, que solían ayudar a que expresaran sus ideas de partida, posteriormente discutir las y, en muchos casos, reformularlas.

Los casos B y C estaban formados, respectivamente, por dos grupos clase de 2.º de ESO de un instituto público de capital de nivel socioeducativo medio y medio-bajo, dentro del contexto del sistema educativo español. El primero de ellos estaba integrado por 25 estudiantes (11 chicos y 14 chicas), mientras que el segundo lo estaba por 23 estudiantes (10 chicos y 13 chicas). Ambos grupos eran de características similares, con intereses y rendimiento escolar parecido en lo que a la asignatura «Física y Química» se refiere. El nivel académico del alumnado podría catalogarse como de tipo medio, sin que contase con una bolsa de repetidores apreciable, pero tampoco con alumnado de alto rendimiento. La actividad fue implementada dentro de la asignatura «Física y Química». Los temas estudiados hasta el momento en ese curso académico eran: la materia y sus propiedades, estados de la materia, modelo cinético molecular, sustancias y mezclas. La actividad fue incluida en la unidad *Cambios químicos*, tras haberse trabajado el concepto de cambio químico a escala macroscópica, así como su interpretación mediante un modelo atómico. La profesora implicada, que era la misma en ambos grupos, contaba con treinta años de experiencia docente y habitualmente enfocaba sus clases desde planteamientos socio-constructivistas, en muchos casos mediante enfoques de modelización. También en este caso las clases se desenvolvían de un modo interactivo, con algunas explicaciones mínimas, pero fundamentalmente mediante diálogos profesor-alumno y actividades en pequeño grupo, cada una seguida de una puesta en común.

Un aspecto importante que hay que considerar es que, en ningún caso, el foco de la investigación se sitúa en la comparación entre grupos. El hecho de contemplar tres casos, y no solo uno, estriba en el deseo de triangular información procedente de distintos grupos clase, al objeto de analizar la transferibilidad de conclusiones.

Instrumentos de recogida de datos y procedimientos de análisis

En la recogida de datos se usaron distintos instrumentos. Por una parte, se recurrió a los portafolios de los alumnos. Por otra, se acudió al diario del profesor y al cuaderno de notas de un observador externo. Además, la clase fue grabada en vídeo, lo que permitió acceder a detalles sobre el discurso de aula en gran grupo y, en ocasiones puntuales, a las discusiones en pequeño grupo.

Para analizar la información se elaboró un sistema de categorías que permitió identificar unidades de información que se repetían en distintas ocasiones, a modo de argumentos-base (tabla 1).

Tabla 1.
Sistema de categorías usado en el análisis de los argumentos-base

<i>Argumentos-base</i>	<i>Descripción</i>
Inflación (I)	Contempla un crecimiento de la masa debido a factores como el aumento de la población, la aparición de nuevos edificios, etc.
Decrecimiento (D)	Considera una disminución de la masa debido a la materia que desaparece: muertes de personas, destrucción por guerras, extinción de especies, etc.
Conservativo local (CL)	Contempla situaciones parciales en la que la masa puede conservarse localmente, aunque no en el conjunto.
Compensatorio (I = D)	Consiste en un uso combinado de esquemas de inflación y de decrecimiento que conduce a que los efectos se compensen.
Conservativo (C)	Se considera que la masa debe ser la misma, a pesar de cambios y transformaciones, y se alude de forma más o menos expresa a la idea de conservación.
La Tierra como sistema abierto (SA)	Concibe la Tierra como un sistema abierto que intercambia materia con el exterior: gases de la atmósfera que escapan, meteoritos que caen, satélites que salen al espacio, etc.

Puede verse cómo, junto a argumentos acordes con planteamientos científicos (C, SA), o intermedios (CL, I = D), aparecen otros totalmente ingenuos que desconocen o no integran la idea de conservación de la materia (I y D). El caso concreto del argumento denominado compensatorio (I = D) realmente aglutina dos argumentos base (I y D), pero al hacerlo de una forma articulada, estableciendo una compensación efectos, preferimos considerarlo como un argumento único.

Este sistema de categorización se construyó progresivamente, de forma inductiva a través de sucesivos intentos de aproximación a los datos. Los únicos criterios empleados *a priori* fueron: *a*) el uso de la idea de conservación de la materia y *b*) la conceptualización de la Tierra como un sistema abierto que intercambia materia con el exterior. En una primera ronda, se intentó categorizar la información de acuerdo con estos criterios. Pero la realidad mostró una situación más compleja, que obligó a ampliar y reformular los criterios de categorización empleados a lo largo de tres rondas. La tabla 1 muestra el sistema de categorización final alcanzado.

Una vez delimitadas las unidades básicas, los argumentos usados en cada fase fueron analizados en términos de combinaciones de ellos (I + D, I + SA, C + SA, etc.), ya que lo habitual fue que, a medida que la actividad avanzaba, se emplearan dos o más argumentos-base. Luego, estas combinaciones fueron agrupadas por similitud y ordenadas mediante una rúbrica de cinco niveles (con el nivel 5 como el más avanzado) (véase tabla 2). Estos niveles fueron la base sobre la que inferimos los modelos empleados por los participantes.

Tabla 2.
Rúbrica para evaluar el nivel de sofisticación de los argumentos usados

<i>Niveles de progresión</i>	<i>Descripción</i>	<i>Respuesta inferida</i>
Nivel 5	Combinación de argumentos conservativos (C) y de Tierra como sistema abierto (SA)	La masa de la Tierra habrá cambiado mínimamente
Nivel 4	Argumentos conservativos (C)	La masa de la Tierra será la misma
Nivel 3	Argumentos compensatorios (tipo I = D), tipo SA o combinaciones de ambos	En los compensatorios, la masa será la misma, en los demás casos habrá variado
Nivel 2	Combinación de argumentos tipo I, D y/o CL	La masa habrá variado
Nivel 1	Argumentos tipo I o D, o respuestas sin sentido o en blanco	La masa habrá variado

Un aspecto que hay que considerar es el de la validez y confiabilidad de los resultados mostrados. En una investigación cualitativa este tipo de valoraciones viene avalada por criterios de credibilidad y transferibilidad. La credibilidad se reconoce por la observación intensiva y la triangulación, aspectos ambos contemplados en la investigación. El primero de ellos se garantiza por el rol de participante-observador que tuvo el/la docente involucrado/a, así como por la presencia de un observador externo, lo que proporcionó un acceso rico y continuo a la información obtenida. El segundo viene acreditado por el uso de instrumentos variados: portfolios, grabaciones, diarios, etc. Por su parte, la transferibilidad alude a la posibilidad de extrapolar sus conclusiones a nuevos casos, razón por la cual se recurrió a tres grupos-clase distintos, al objeto de poner a prueba dicha posibilidad.

Finalmente, hay que señalar que todos los procesos de categorización que se realizaron fueron emprendidos conjuntamente por dos jueces distintos, recurriendo a un tercero en los casos en los que había desacuerdo.

RESULTADOS

Sobre el transcurso de la sesión y los argumentos manejados

El desarrollo de la actividad fue similar en los tres casos, como también la tipología de argumentos encontrados.

Inicialmente, el profesor planteó el problema expresando numéricamente un supuesto valor preciso de la masa con todas sus cifras. Luego, se repartieron los portfolios a los estudiantes, quienes desarrollaron la primera fase de manera individual. En esta fase respondieron directamente al interrogante planteado, lo que sirvió para la reflexión, así como para expresar sus primeros argumentos. Durante toda la fase, como también sucedió con la siguiente, el rol del profesor fue solo el de pasear por las mesas y hacer aclaraciones sobre el propósito de la tarea que había que desarrollar.

La idea que predominaba era que la masa de la Tierra aumentaría debido a factores diversos. En unos casos, las respuestas se basaron en argumentos simples, tipo inflación (I), pero en otros surgieron en combinación con otro tipo de explicaciones, lo que derivó en distintos tipos de respuesta:

Pienso que la masa es mayor porque la población ha aumentado, ha habido cambios en el entorno que pueden haber cambiado la masa de la Tierra, con nuevas grandes construcciones (argumento tipo I, Ana, caso A).

Porque hay cada vez más edificios y más altos, y aunque mueren personas son más las que nacen, con lo que la Tierra pesará más (argumento tipo I + D, Abel, caso C).

A pesar de que los argumentos inflacionarios fueron mayoritarios, en los casos B y C, una parte de los participantes proporcionó respuestas con argumentos simples de decrecimiento (D), esgrimiendo razones como la extinción de especies, la pérdida forestal o efectos nocivos del calentamiento global, entre otros:

Pienso que la masa habrá disminuido, ya que durante todo este tiempo se han perdido montones y montones de materia en los árboles, por la pérdida de especies en extinción y por el derretimiento de los polos (argumento tipo D, Iván, caso B).

Otro tipo de respuesta, aunque con incidencia menor, se basó en argumentos de tipo compensatorio:

Porque hace 88 años no había tantas cosas creadas, pero... ahora hay más incendios debido al calentamiento global y el hielo ya no pesa tanto. Unas cosas compensan a las otras, con lo que la masa no habrá variado (argumento tipo I = D, Eva, caso B).

El caso de Joel es curioso, ya que asumía el principio de conservación de la masa, pero le atribuía un alcance solo local para fenómenos específicos, mientras que encontraba otros de carácter inflacionario (argumento tipo I + CL):

... Aunque es verdad que la masa no puede ser creada ni destruida, hay que tener en cuenta los nuevos edificios, el aumento de la población, e incluso que se van creando progresivamente nuevas montañas debido al movimiento de la tectónica de placas (argumento tipo I + CL, Joel, Caso A).

Además, algún que otro alumno introdujo el carácter abierto del sistema Tierra, contemplando la entrada de meteoritos como factor que modifica su masa, aunque de un modo insignificante (SA).

La masa será ligeramente mayor... aparecen meteoritos y otras pequeñas cosas del espacio, pero el peso de la Tierra es tan grande que un cambio en pocas toneladas es casi insignificante... (argumento tipo SA, Noé, Caso A).

En la segunda fase los estudiantes continuaron trabajando de manera individual, pero esta vez debían contemplar, sucesivamente, acontecimientos que pudieran hacer aumentar la masa de la Tierra, junto a otros que podrían mantenerla inalterable o disminuirla. De este modo, se intentaba favorecer la adopción de otros puntos de vista diferentes a los iniciales, haciéndoles entrar en conflicto y sugiriéndoles argumentos más complejos. De hecho, como resultado de la actividad, una amplia mayoría incorporaron nuevos factores a sus argumentos. Por ejemplo, surgieron más estudiantes que contemplaban simultáneamente procesos parciales de decrecimiento y de inflación, circunstancia minoritaria en la fase 1. Esta novedad tuvo mayor incidencia en el caso A que en el B o el C. En alguna ocasión, este efecto parcial de disminución de la masa se argumentó aludiendo al escape de gases de la atmósfera al exterior, lo que hizo aparecer de nuevo el carácter abierto del sistema Tierra.

En la tercera fase los alumnos reflexionaron de nuevo en torno a las mismas preguntas, aunque esta vez en pequeños grupos de tres a cuatro estudiantes. Dicha situación resultó rica y estimulante en el caso A; también lo fue, pero en menor medida, en el caso C, y resultó menos fructífera en el caso B. Así, en la mayoría de los pequeños grupos del caso A, se originaron múltiples debates y discusiones, en los cuales las ideas de los estudiantes se complementaban, abrían nuevos interrogantes o incluso entraban en conflicto, sirviendo de oportunidad para procesos de reestructuración.

Por ejemplo, en uno de los pequeños grupos del caso A, tras debatir juntas sus tres alumnas componentes, llegaron a argumentos de conservación:

Gema: Paco [profesor], ¿puedes venir?

Profesor: Dime.

Gema: Esta actividad me ha abierto la mente. Todo lo que está en la Tierra estaba antes, de otra manera, pero estaba.

Profesor: Explícate.

Gema: Por ejemplo, pensamos que destruyendo un edificio quitamos masa, pero los escombros quedan, y se tiran o se usan para otra cosa, pero están. O, al contrario, si hacemos una casa, partimos de materiales que ya estaban...

Esta misma alumna, Gema, dejaba constancia en su portfolio de la siguiente reflexión:

Pienso que la masa permanecerá igual porque la materia es la misma... Por ejemplo, cuando un edificio se derriba no desaparece, sino que cambia de forma. Nosotros pensamos que la materia no puede crearse ni desaparecer... La materia está hecha de partículas que pueden recomponerse, pero no destruirse.

Puede verse cómo Gema completa su reflexión usando un modelo submicroscópico, básicamente alineado con la teoría atómica de Dalton, algo que no llegó a observarse en casi ningún otro caso.

En otro pequeño grupo del caso A surgieron interesantes dilemas, como el de «¿qué pesa más, el hielo o el agua?» o «¿qué pasa con las personas que adelgazan, esos kilos que pierden y desaparecen ya no cuentan para el peso total de la Tierra?». Aunque en esta ocasión no se llegó a apreciar un cambio decisivo en los argumentos manejados, sí parece que contribuyó al intercambio de concepciones alternativas.

En los casos B y C, como decíamos, esta fase parece que fue menos productiva, a tenor del menor número de aportaciones novedosas registradas, y de los menores avances observados en los argumentos usados. De hecho, una parte importante de los grupos reincidía en argumentos iniciales, ya fueran de inflación o compensatorios. No obstante, en más de una ocasión emergió una idea relevante, como la de prever y justificar la invariancia de la masa en términos de «ciclos» o procesos circulares que implican que la masa no modifique su valor:

Se mantiene igual porque, aunque la materia cambie, se conserva. La masa que creíamos desaparecida se mantiene dentro de un ciclo y no sale de la Tierra (argumento tipo C, Orson, caso B).

Con posterioridad, la fase 4 sirvió para que se entablara una puesta en común, moderada por el profesor, en la que los distintos grupos defendieron posiciones del gran grupo clase. El/la docente dirigió las intervenciones, aportó pistas, planteó preguntas, reorientó las explicaciones inadecuadas y resaltó los argumentos más apropiados, pero no llegó a recurrir de forma explícita el principio de conservación.

Esta idea de conservación surgió espontáneamente en el caso A, a partir de las aportaciones de uno de los pequeños grupos, la cual fue bien acogida por una parte importante de los estudiantes de ese grupo clase. Sin embargo, costó mucho más que surgiera en la discusión en gran grupo en los casos B y C, donde la idea de conservación se resistió a aflorar. Por ejemplo, en el caso B solo empezó a surgir cuando la profesora planteó preguntas muy dirigidas en torno a ideas como las de cadenas tróficas, la nutrición humana, la fotosíntesis, etc., y su vinculación con los cambios físicos y químicos. Así, a raíz de la aportación de una de las alumnas (Lara), surgió el problema de los residuos plásticos y su inserción en la cadena alimenticia humana a través de los microplásticos:

Lara: Creemos muchas veces que desaparece la materia, pero en verdad no. Como, por ejemplo, tiramos plásticos a la basura y creemos que desaparecen, pero en verdad lo que ocurre es que se desplazan a otros sitios.

Profesora: Había cambios que pensábamos que aumentaban la masa, y resulta ahora que no, que parece que lo que aumenta sale de otro sitio... desaparece de un lugar y en otro sitio surge. Por ejemplo, al hablar de la basura se habla mucho hoy de los microplásticos, ¿verdad? ¿Alguien sabe cuál es el problema de los microplásticos?

Keira: Son trozos pequeños de plásticos que tardan mucho en desaparecer.

Profesora: ¿Y qué les pasa?

León: [...] esos plásticos se lo pueden llegar a comer los peces y también los humanos al comer esos peces.

Profesora: Entonces resulta que tiramos plásticos a la basura, que llegan al mar, que se lo comen los peces y que llegan por tanto de nuevo a nosotros a través de los peces que nos comemos.

Jane: La materia está metida en un ciclo del que no sale ni entra nada.

Esta idea de funcionamiento cíclico ya apareció de forma espontánea en la fase anterior, y puede considerarse en cierto modo sucedánea de la de conservación. Aunque es cierto que no se liga de manera explícita a procesos de cambio específicos, supera al argumento de compensación y puede considerarse como una primera aproximación a un esquema de conservación que ya parece presente de manera tácita.

Finalmente, la fase 5 constituyó otro momento de reflexión individual en la que los alumnos cotejaron y valoraron argumentos propios y ajenos hasta formular conclusiones. Como consecuencia de ello, una parte importante de los participantes alcanzó la respuesta y explicación considerada como más deseable, combinando un argumento de conservación (C) y otro de Tierra como sistema abierto (SA):

La masa de la Tierra no debería cambiar cuando se producen cambios químicos, cuando los polos o la capa de ozono disminuyen, o cuando nacen nuevos seres vivos. Pero la masa podría disminuir porque se produce una liberación frecuente de gases, o se podría incrementar con la llegada de meteoritos o seres vivos del espacio (argumento tipo C +S A, Orson, caso B).

Otra parte logró usar un argumento de conservación (C), sin tener en cuenta el intercambio de materia con el exterior, y predijo la no variación de la masa de la Tierra.

Una parte importante también focalizó íntegramente su atención en la conceptualización de la Tierra como sistema abierto (SA), sin aludir a los procesos internos de transformación.

Hemos llegado a la conclusión de que la masa ha disminuido... no muy abundantemente ya que hay cuerpos que han salido de la Tierra... (argumento tipo SA, Lucas, caso B).

Resulta imposible saber si, en estos casos, la representación que los participantes tenían en mente respondía o no a un modelo de conservación, ya que sus argumentos omitían cualquier mención a los cambios que suceden en la Tierra. Pudiera ser que se estuviera usando de forma implícita un argumento de conservación, pero también se podría estar empleando uno de compensación, por lo que no puede considerarse como un argumento satisfactorio.

El alumnado restante aportó argumentos que no recurrían a esquemas de conservación, o respuestas de tipo «no codificables» o «en blanco».

Análisis comparativo de los argumentos usados a lo largo de la actividad

La rúbrica de la tabla 2 permitió comparar los argumentos empleados en las fases 1 y 5, como aproximación a un estudio evolutivo a lo largo de la actividad. La tabla 3 presenta los resultados obtenidos. En su última columna aparece la distribución de frecuencias en la fase 1, en la última fila la correspondiente a la fase 5, y en cada una de las casillas, toda la casuística de tránsitos posibles entre ambas fases.

Las casillas sombreadas recogen a los estudiantes que han experimentado algún progreso, tanto más cuanto más se acercan al vértice superior derecho de cada tabla.

Tabla 3.
Tablas comparativas de resultados entre las fases 1 y 5

		<i>Caso A (Fase 5)</i>						<i>Caso B (Fase 5)</i>						<i>Caso C (Fase 5)</i>						
		Niveles					Total	Niveles					Total	Niveles					Total	
		1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5	Total	
Fase I	Niveles	1	-	1	1	1	1	4	2	-	3	1	9	15	3	-	6	1	6	16
		2	-	-	2	1	1	4	1	-	1	-	2	4	-	-	1	2	2	5
		3	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	4	4	-	1	-	-	-	1
		4	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2	-	-	-	1	-	1
		5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		-	1	3	2	3	9	3	-	5	1	16	25	3	1	7	4	8	23	

La tabla 4 presenta un balance final de la progresión alcanzada por los estudiantes. Se aprecia que todos los alumnos progresaron en el caso A, que 21 de 25 lo hicieron en el caso B, y que 18 de 23 evolucionaron en el C. En conjunto, cinco de cada seis estudiantes progresaron en alguna medida, aunque no todos con el mismo alcance, ni tampoco todos partieron de los mismos niveles iniciales. Al final, seis de cada diez participantes asumieron la conservación de la masa (niveles IV o V), la mayoría de ellos combinándola con la idea de Tierra como sistema abierto. Mientras tanto, solo uno de cada veinte conservaba la masa inicialmente y, de ellos, ninguno alcanzaba el nivel máximo de la rúbrica.

Tabla 4.
Balance de progresión entre las fases 1 y 5

	<i>Estudiantes que avanzan</i>	<i>Estudiantes que no cambian</i>	<i>Estudiantes que retroceden</i>
Caso A (n = 9)	9	-	-
Caso B (n = 25)	21	2	2
Caso C (n = 23)	18	4	1

En resumen, se detecta un patrón de progresión, que partiría de argumentos ingenuos, simples y alejados de la idea de conservación, hacia otros que evolucionan hacia argumentos más complejos y adecuados.

DISCUSIÓN

Como se ha visto, al inicio de la actividad los estudiantes movilizaban argumentos ingenuos y simples, alejados de la ciencia escolar, si bien evolucionaron hacia argumentos más complejos y próximos a los que son deseables. De hecho, casi todos ellos progresaron en sus puntos de vista, y más de la mitad llegó a formular argumentos que integraban espontáneamente la conservación de la masa. A lo largo de la actividad, los argumentos aportados subyacían, al menos, tras cuatro modelos distintos:

- a) un modelo de cambio en la materia de tipo no conservativo, según el cual la masa no se conserva de forma neta, aunque puedan existir procesos parciales en los que sí se conserve (niveles 1 y 2);

- b) un modelo de tipo compensatorio, o de pseudoconservación, en el que la cantidad de masa puede quedar inalterada, pero a resultas de compensación de efectos parciales de decrecimiento e inflación de la masa (nivel 3);
- c) un modelo conservativo simple, consecuente con el principio de conservación de la masa, en el que se concibe al planeta como un sistema aislado del exterior (nivel 4);
- d) un modelo conservativo complejo, en el que además de conservarse la masa, se contempla la Tierra como sistema abierto que intercambia materia con el exterior (nivel 5).

Al comenzar la actividad los modelos mayoritarios fueron el «no conservativo» y el «compensatorio», mientras que al final la mayoría de los participantes se instaló en el «modelo conservativo complejo» y, en menor medida, en el «conservativo simple».

De ello no se desprende que los progresos detectados sean estables e irreversibles, pues una actividad, por sí sola, no tiene capacidad para generar cambios definitivos e irreversibles. Antes, al contrario, cualquier aprendizaje exige actuaciones continuadas en el tiempo, junto a un variado repertorio de contextos que propicie procesos de transferencia. Lo que estos resultados sí nos dicen es que la actividad realizada, basada en el desarrollo individual, grupal y colectivo de un experimento mental, supuso un factor favorecedor del uso de la idea de conservación, y aportó un contexto favorecedor para que dichas ideas emergieran espontáneamente en los argumentos empleados.

La primera fase sirvió para que los estudiantes se planteasen un problema y construyeran un primer modelo para dar respuesta a este, la mayoría de las veces evocando un modelo inflacionario en el que la masa crece.

La segunda fase aportó a los estudiantes una ocasión para delimitar con detalle los aspectos relevantes del sistema estudiado mediante el experimento mental. Fue, por tanto, esencial para que revisaran su modelo inicial y entraran en escena nuevas ideas que cuestionaron las formuladas al principio. Esto sirvió como fuente de nuevas ideas, algo que resulta clave para iniciar la progresión hacia nuevos posicionamientos (Sanmartí, 2000).

La tercera y la cuarta fase fueron, sin duda, las que, en conjunto, más contribuyeron a cambios en los modelos manejados. De un lado, el trabajo en pequeño y gran grupo sirvió como una nueva ocasión para que los estudiantes organizaran y estructuraran sus ideas al objeto de comunicarlas y debatirlas ante otros. De otro, sirvió para que estos compartieran y reestructurasen sus puntos de vista, contraponiendo y discutiendo sus modelos, e intentando negociar posiciones hasta llegar a acuerdos. En estas fases, además, fue importante la labor de los docentes implicados, quienes, sin aportar de forma directa su punto de vista, propusieron preguntas, sugirieron nuevas formas de ver el fenómeno, solicitaron aclaraciones, aportaron pistas, recondujeron los diálogos, etc. (Aliberas, Gutiérrez e Izquierdo, 2017; Crujeiras Pérez y Jiménez Aleixandre, 2018). Sin duda, fue este el momento en el que el experimento mental fue desarrollado en su mayor plenitud, para lo que se aportaron resultados mejor argumentados y conclusiones más elaboradas. Conviene indicar que el principio de conservación de la materia había sido ya estudiado con anterioridad, si bien, a tenor de los primeros argumentos formulados, no parece que se tuviese integrado en la estructura cognitiva. Según ello, es probable que el experimento mental desarrollado sirviese, precisamente, para que el alumnado encontrase sentido y significado a algo que ya conocían, pero a un nivel meramente declarativo. Aunque solo una pequeña fracción de los estudiantes fue capaz de elaborar autónomamente un argumento de conservación mediante este mecanismo, otros pudieron encontrarlo gracias al debate y discusión en pequeño y gran grupo.

En suma, la construcción de ideas a lo largo de estas fases supuso algo más que una suma de modelos individuales, por lo que se produjo en su lugar un complejo proceso interactivo entre estos. Por tanto, el uso de un experimento mental en un marco de aprendizaje activo y participativo, el entorno de colaboración en el que trabajaron los alumnos y la función mediadora del profesor pudieron cons-

tituir juntos una excelente combinación para alentar a los alumnos a trabajar en su zona de desarrollo próximo (Vygotsky, 1978).

Los resultados obtenidos muestran el papel de los experimentos mentales a la hora de promover escenarios de modelización en ciencias; en este caso, a la hora de favorecer la construcción de un modelo escolar apropiado sobre la conservación de la materia en un sistema abierto. Además, se aprecia un importante paralelismo entre los resultados obtenidos en los tres casos estudiados, lo que sugiere un cierto nivel de transferibilidad en las conclusiones obtenidas. Ello avala el marco teórico presentado, en el cual se destaca el valor del trabajo compartido en el aula (Seel, 2017), la contribución de los experimentos mentales en los procesos de modelización en ciencias (Reiner, 1998; Reiner y Gilbert, 2000) y el impulso y refuerzo que suponen ambos ingredientes cuando se dan juntos en situaciones de aula (Reiner y Gilbert, 2000; Velentzas y Halkia, 2013).

En la actualidad estamos desarrollando actividades con experimentos mentales en distintos ámbitos del currículum de ciencias, tanto en secundaria como en formación inicial de maestros. Los resultados de los correspondientes estudios permitirán comprobar si los obtenidos en este son extrapolables a otros casos, y mostrar así el potencial de estos recursos para la modelización en ciencias. Más allá de ello, nuestra intención es también insertar actividades de este tipo en secuencias de enseñanza-aprendizaje más amplias y que impliquen un número determinado de sesiones de aula, integrándose con otros recursos instrumentales de modelización, como analogías, simulaciones, animaciones, etc., así como con otro tipo de actividades. Esperamos poder reportar en breve los resultados y conclusiones obtenidas.

AGRADECIMIENTOS:

Financiado por FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades-Agencia Estatal de Investigación/_Proyecto EDU2017-82518-P

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Díaz, J. A., García-Carmona, A., Aragón-Méndez, M. y Oliva-Martínez, J. M. (2017). Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. *Revista Científica*, 30(3), 155-166. <https://doi.org/10.14483/23448350.12288>
- Adúriz-Bravo, A. (2012). Algunas características clave de los modelos científicos relevantes para la educación química. *Educación química*, 23, 1-9. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(17\)30151-9](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(17)30151-9)
- Aliberas, J., Gutiérrez, R. e Izquierdo, M. (2017). Introducción a un método para la conducción y análisis de diálogos didácticos basado en la evaluación de modelos mentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 35(2), 7-28. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2028>
- Bitsakis, E. (1991). Mass, Matter, and Energy. *Foundations of Physics*, 21(1), 63-81. <https://doi.org/10.1007/BF01883563>
- Bunge, M. (1973). *Method, Model and Matter*. Dordrecht: Reidel Publishing Company.
- Cardoso Mendonça, P. C. y Justi, R. (2013). The relationships between modelling and argumentation from the perspective of the model of modelling diagram. *International Journal of Science Education*, 35(14), 2407-2434. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.811615>

- Crujeiras Pérez, B. y Jiménez Aleixandre, M. P. (2018). Influencia de distintas estrategias de andamiaje para promover la participación del alumnado de secundaria en las prácticas científicas. *Enseñanza de las Ciencias*, 36(2), 23-42. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2241>
- Cubero, R. (2001). Maestros y alumnos conversando: el encuentro de las voces distantes. *Investigación en la Escuela*, 45, 7-19.
- Dauer, J. M., Doherty, J. H., Freed, A. L. y Anderson, C. W. (2014). Connections between Student Explanations and Arguments from Evidence about Plant Growth. *CBE-Life Sciences Education*, 13, 397-409.
<https://doi.org/10.1187/cbe.14-02-0028>
- Donati, E. y Andrade Gamboa, J. (2004). Propiedades de las Disoluciones a través de experimentos Mentales. *Educación Química*, 15(4), 432-435.
- Ericksen, E. y Vojenli, K. (1976). The Classical and Relativistic Concepts of Mass. *Foundations of Physics*, 16(1), 115-124.
<https://doi.org/10.1007/BF00708670>
- Furió, C., Hernandez, J. y Harris, H. (1987). Parallels between adolescents' conception of gases and history of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 64(7), 616-618.
<https://doi.org/10.1021/ed064p616>
- Gilbert, J. K. y Boulter, C. (1995). Stretching models too far. *Annual Conference of the American Educational Research Association*. San Francisco.
- Gilbert, J., Boulter, C. y Elmer, R. (2000). Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. En J. K. Gilbert y C. J. Boulter (Eds.), *Developing Models in Science Education* (pp. 3-17). Dordrecht: Kluwer.
- Gilbert, J. K. y Reiner, M. (2000). Thought experiments in science education: potential and current realization. *International Journal of Science Education*, 32(3), 265-283.
<https://doi.org/10.1080/095006900289877>
- Gobert, J. D. y Buckley, B. C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 891-894.
<https://doi.org/10.1080/095006900416839>
- Gómez, M. A., Pozo, J. I. y Sanz, A. (1995). Students' ideas on conservation of matter: Effects of expertise and context variables. *Science Education*, 79(1), 77-93.
<https://doi.org/10.1002/sci.3730790106>
- Gómez Loarces, R., Fernández Ferrer, G. y González García, F. (2019). Evolución de los modelos mentales sobre fosilización tras el proceso de enseñanza-aprendizaje. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16(2), 2102.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2019.v16.i2.2102
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. y Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science: conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799-822.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660280907>
- Gutiérrez, R. (2005). Polisemia actual del concepto «modelo mental»: Consecuencias para la investigación didáctica. *Investigações em Ensino de Ciências*, 10(2), 209-226.
- Hadenfeldt, J. C., Liu, X. y Neumann, K. (2014). Framing students' progression in understanding matter: A review of previous research. *Studies in Science Education*, 50(2), 181-208.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2014.945829>
- Hadenfeldt, J. C., Neumann, K., Bernholt, S., Liu, X. y Parchmann, I. (2016). Students' progression in understanding the matter concept. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(5), 683-708.
<https://doi.org/10.1002/tea.21312>

- Harrison, A. G. y Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011-1026.
<https://doi.org/10.1080/095006900416884>
- Heyl, P. R. A. (1930). Redetermination of the constant of gravitation. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 5, 1243-1290.
- Holton, G. y Brush, S. (1988). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- Jiménez-Aleixandre, M. P. y Puig, B. (2010). Argumentación y evaluación de explicaciones causales en ciencias: el caso de la inteligencia. *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 63, 11-18.
- Johnson-Laird, P. N. (1996). Images, models, and propositional representations. En De Vega et al. (Eds.), *Models of visuospatial cognition* (pp. 90-107). Nueva York: Oxford University Press.
- Justi, R. y Gilbert, J. K. (2002). Modelling teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.
<https://doi.org/10.1080/09500690110110142>
- Landau, L. y Lastras, L. (1996). Cambios químicos y conservación de la masa... ¿Está todo claro? *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), 171-174.
- Mohan, L, Chen, J. y Anderson, C. W. (2009). Developing a multi-year learning progression for carbon cycling in socio-ecological systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 46, 675-698.
<https://doi.org/10.1002/tea.20314>
- Monteira, S. F. y Jiménez Aleixandre, M. (2019). ¿Cómo llega el agua a las nubes? Construcción de explicaciones sobre cambios de estado en educación infantil. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 16(2), 2101.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2019.v16.i2.2101
- Moreira M. A., Greca I. M. y Rodríguez Palmero, M. L. (1997). Los modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza/aprendizaje de las ciencias. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2(3), 36-56.
- Morell, L., Collier, T., Black, P. y Wilson, M. (2017). A construct-modeling approach to develop a learning progression of how students understand the structure of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(8), 1024-1048.
<https://doi.org/10.1002/tea.21397>
- Morrison, M. y Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. En M. S. Morgan y M. Morrison (Eds.), *Models as mediators* (pp. 10-37). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nersessian, N. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. En L. Magnani, N. J. Nersessian y P. Thagard (Eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery*. Nueva York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.
- Oliva, J. M. (2019). Distintas acepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 37(2), 5-24.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2648>
- Oñorbe de la Torre, A. J. y Sánchez Jiménez, J. M. (1992). La masa no se crea ni se destruye ¿Estáis seguros? *Enseñanza de las Ciencias*, 10(2), 165-171.
- Passmore, C. M. y Svoboda, J. (2012). Exploring Opportunities for Argumentation in Modelling Classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(10), 1535-1554.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2011.577842>
- Pozo, J. I. (1989). *Teorías cognitivas del aprendizaje*. Madrid: Morata.
- Reiner, M. (1998). Thought experiments and collaborative learning in physics. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1043-1058.
<https://doi.org/10.1080/0950069980200903>

- Reiner, M. y Burko, L. (2003). On the limitations of thought experiments in physics and the consequences for physics education. *Science and Education*, 12, 385-358.
<https://doi.org/10.1023/A:1024438726685>
- Reiner, G. y Gilbert, J. (2000). Epistemological resources for thought experimentation in science learning. *International Journal of Science Education*, 22(5), 489-506.
<https://doi.org/10.1080/095006900289741>
- Reiner, M. y Gilbert, J. K. (2004). The symbiotic roles of empirical experimentation and thought experimentation in the learning of physics. *International Journal of Science Education*, 26(15), 1819-1834.
<https://doi.org/10.1080/0950069042000205440>
- Revel Chión, A. y Adúriz-Bravo, A. (2019). Modelización y argumentación en la enseñanza de las Ciencias Experimentales. *Didacticae*, 5, 2-5.
<http://dx.doi.org/10.1344/did.2019.5.3-6>
- Sanmartí, N. (2000). El diseño de unidades didácticas. En F. J. Perales y P. Cañal (Eds.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pp. 239-276). Alcoy: Marfil.
- Seel, N. M. (2017). Model-based learning: A synthesis of theory and research. *Educational Technology Research and Development*, 65(4), 931-966.
<https://doi.org/10.1002/tea.2031110.1007/s11423-016-9507-9>
- Shayer, M. y Adey, P. (1984). *La ciencia de enseñar ciencias: desarrollo cognoscitivo y exigencias del currículo*. Madrid: Narcea.
- Smith, C. L., Wisner, M., Anderson, C. W. y Krajcik, J. (2006). Implications of Research on Children's Learning for Standards and Assessment: A Proposed Learning Progression for Matter and the Atomic-Molecular Theory. *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, 4(1-2), 1-98.
<http://dx.doi.org/10.1080/15366367.2006.9678570>
- Sorensen, R. A. (1992). *Thought experiments*. Nueva York: Oxford University Press.
- Stavy, R. (1990). Children's conception of changes in the state of matter: From liquid (or solid) to gas. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(3), 247-266.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660270308>
- Velentzas, A. y Halkia, K. (2013). The Use of Thought Experiments in Teaching Physics to Upper Secondary-Level Students: Two examples from the theory of relativity. *International Journal of Science Education*, 35(18), 3026-3049.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2012.682182>
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- Vygotsky, L. (1978). *Mind and Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Does the mass of the Earth vary? Modeling through thought experiment

José M^a Oliva
Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.
josemaria.oliva@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-2686-6131>

Juan José Vicente Martorell
Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.
juanjose.vicente@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7498-0214>

Rosario Franco-Mariscal
IES Castillo de Luna, Rota, Cádiz.
rosario.franco@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-5535-7216>

María del Mar Aragón Méndez
Departamento de Didáctica,
Universidad de Cádiz.
mariadelmar.aragon@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-5997-389X>

Jesús Matos Delgado
IES Santo Domingo, El Puerto de Santa
María, Cádiz.
jmatosd@yahoo.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-0770-2641>

Francisco Soto Mancera
Colegio Británico Sage College.
Jerez de la Frontera, Cádiz.
francisco.sotomancera@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7974-7470>

Rubén Marín Barrios
IES Huerta del Rosario, Chiclana, Cádiz.
ruben.marin@uca.es. ORCID:
<https://orcid.org/0000-0003-2288-7610>

The conservation of mass is one of the necessary requirements for the understanding of the idea of matter and, therefore, for the study of science, in general, and more particularly of chemistry. Although this notion is repeatedly studied in school, many students who finish compulsory secondary school and high school fail to understand or integrate it into their explanations, especially if the phenomena involve chemical reactions, particularly with the intervention of gases.

From our point of view, the idea of conservation of the mass should be constructed in intimate connection with the closed or open character of the system in which it is verified, analyzing different possible cases, until concluding that, in all of them, the conservation of the mass is complied when performing a material balance.

This paper analyzes the effect of the resolution of a qualitative problem through a mental experiment, in the use of the idea of conservation of mass. Its purpose is to identify the models expressed by the students, and how they adjust and self-regulate because of the work in the classroom.

The problem was to determine whether the Earth's mass varies over time. The task was developed in several phases: *a*) autonomous individual working, *b*) guided individual working, *c*) small group discussion, *d*) large group debate, *e*) individual formulation of conclusions. This activity can be considered as a mental experiment, by integrating all the ingredients indicated in the literature for this type of reasoning.

The research questions were as follows: *i*) what models did the students use in response to the problem posed during the activity?, and *ii*) which net changes were observed in these models at the end of the activity?

To answer these questions, a multiple case study was carried out with secondary school students, one of them with 9th grade students (case A) and two with 8th grade students (cases B and C). The research approach was qualitative.

Throughout the mental experiment, students began mobilizing simple and naive models, based on a non-conservation of matter, while more than half ended up formulating others that spontaneously integrated the principle of conservation of mass and the idea of Earth as an open system. Specifically, the models found were:

1. a non-conservative model of change, according to which the mass is not conserved net, although there may be partial processes in which it is conserved;
2. a compensatory type of model, in which the amount of mass may remain unchanged, thanks to a compensation of partial effects of decrease and inflation of the mass;
3. a simple conservative model, consistent with the principle of conservation of mass, in which the planet is conceived as an isolated system from the outside; and
4. a complex conservative model, like the previous one, but which also contemplates the Earth as an open system that can exchange matter with the outside.

All students progressed in case A, 21 of 25 did so in case B, and 18 of 23 evolved in C. Overall, five out of six students progressed to some extent, although not all with the same scope, nor did they all start from the same initial levels. In the end, approximately six out of ten participants assumed the conservation of the mass, most of which did so by combining it with the idea of Earth as an open system. Meanwhile, initially, only one in twenty retained the mass and, of them, none reached the maximum level of the rubric.

It does not follow that the progress detected is stable and irreversible, since any learning requires time and a varied repertoire of contexts that allow transfer processes. What these results do tell us is that the activity carried out, based on the individual, group, and collective development of a mental experiment, was a favorable factor for the use of the idea of conservation, providing a rich and stimulating context for these ideas emerged spontaneously in the arguments used

