



Dificultades de aprendizaje del modelo de sonido: una revisión de la literatura

Learning difficulties about the sound model: a review of the literature

Arantza Rico, Aritz Ruiz-González

Science, Technology and Mathematics Education Research (STEMER), Departamento de Didáctica de la Matemática y las Ciencias Experimentales, Facultad de Educación y Deporte, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Vitoria-Gasteiz (España).
arantza.rico@ehu.eus, aritz.ruiz@ehu.eus

Oier Azula

IES Artaza Romo BHI, Amaia Etorbidea, 28, 48940 Leioa (España).
irbiooierazula@artazaromo.com

Jenaro Guisasola

Science, Technology and Mathematics Education Research (STEMER), Departamento de Física Aplicada I, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Donostia (España).
jenaro.guisasola@ehu.eus

RESUMEN • El aprendizaje del modelo científico del sonido (MCS) está presente en el currículum de ciencias de todos los niveles educativos y es un componente crítico de la alfabetización científica. Este trabajo presenta una revisión sistemática sobre la comprensión de los estudiantes del MCS en torno a tres ideas claves que emergen del análisis epistemológico: naturaleza del sonido y sus propiedades, propagación del sonido y modelo de onda. Cabe destacar que, independientemente de la etapa educativa, existe una dificultad en relacionar las propiedades intrínsecas del sonido con las magnitudes de onda y la persistencia de concepciones que atribuyen propiedades materiales al sonido. Además, no existe una clara progresión del aprendizaje sobre el MCS desde la Educación Primaria hasta los primeros años de Universidad. Finalmente, se discuten las implicaciones para la enseñanza-aprendizaje del MCS.

PALABRAS CLAVE: Enseñanza/aprendizaje de la física; Ondas mecánicas; Dificultades de aprendizaje; Sonido.

ABSTRACT • Learning the scientific model of sound (ScMS) is present in the science curriculum of all educational levels and is a critical component of scientific literacy. This paper presents a systematic review of students' understanding the ScMS around three key ideas that emerge from the epistemological analysis: nature of sound and its properties, propagation of sound and the wave model. It should be noted that, regardless of the educational stage, there is a difficulty in relating the intrinsic properties of sound to wave magnitudes and a persistence of conceptions that attribute material properties to sound. In addition, there is no clear learning progression of the ScMS from Primary Education to the early years of University. Finally, the implications for teaching and learning the ScMS are discussed.

KEYWORDS: Teaching/learning of physics; Mechanical waves; Learning difficulties; Sound.

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

Rico, A., Ruiz-González, A., Azula, O. y Guisasola, J. (2021). Dificultades de aprendizaje del modelo de sonido: una revisión de la literatura. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(2), 5-23.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3217>

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos acústicos están estrechamente relacionados con nuestra vida cotidiana y, por ello, la comprensión del modelo científico del sonido (MCS) forma parte de los currículums de ciencias desde primaria hasta la universidad (Rossing et al., 2002). Asimismo, el sonido –entendido como un fenómeno ondulatorio– puede contribuir a la comprensión de conceptos generales de la física actual (Eshach et al., 2016). Sin embargo, la transición de la comprensión del MCS, desde un punto de vista fenomenológico e interpretativo, a la comprensión, como un fenómeno ondulatorio, no parece ser trivial, ya que el alumnado de todas las etapas parece presentar dificultades para describir y conceptualizar el sonido (Eshach et al., 2016; Hrepic et al., 2010). La necesidad de información sobre las concepciones y formas de razonamiento del alumnado es particularmente necesaria en aquellas áreas del currículum que se repiten continuamente a lo largo de la enseñanza, como es el caso del MCS (Eshach, 2014). No obstante, en una revisión sobre investigación en enseñanza de la física (National Research Council, 2013), no aparece ninguna referencia respecto al sonido frente a una prevalencia de investigaciones sobre mecánica clásica, mecánica cuántica, electricidad y magnetismo. Además, las revisiones sobre la comprensión de los estudiantes sobre el MCS se limitan a una etapa educativa concreta o a un único aspecto conceptual, por ejemplo, la naturaleza del sonido (Caleon y Subramaniam, 2010), o su propagación (West y Wallin, 2013). De hecho, todavía hay dudas a la hora de establecer los diferentes niveles de complejidad del sonido y sus características desde primaria hasta la universidad. Así pues, la revisión que abordamos en este artículo sobre investigaciones de dificultades en el proceso de enseñanza-aprendizaje del MCS puede aportar información novedosa y sistemática para el profesorado, investigadores y autores de libros de texto y diseñadores curriculares.

Según el enfoque constructivista del aprendizaje, tener en cuenta las ideas de los estudiantes es fundamental para realizar un retrato de su comprensión y permite tomar decisiones sobre el diseño del currículum y las secuencias de enseñanza (Taber, 2015). Además, las investigaciones en torno a las progresiones del aprendizaje de los estudiantes tienen en cuenta que el cambio conceptual es más un proceso gradual que un cambio repentino de ideas ingenuas a ideas científicas (von Aufschnaiter y Rogge, 2015).

La bibliografía propone, como elemento fundamental, la integración sistemática de los resultados de la investigación sobre dificultades de aprendizaje en el programa vertical de enseñanza, ya que refleja la forma en que los estudiantes progresan en la comprensión de los conceptos de ciencias fundamentales (Duschl et al., 2011). De hecho, la progresión en el aprendizaje (PA) se ha erigido como una herramienta importante desde su inclusión en las directrices de evaluación del National Research Council (2007). En este artículo tenemos en cuenta elementos relacionados con la definición de PA de Gotwals y Anderson (2015) y Duschl et al. (2011), tales como el contenido que se enseñará, el conocimiento previo de los estudiantes y lo que se espera que aprendan al final de la instrucción.

En consecuencia, el conocimiento de las concepciones de los estudiantes es una componente básica en el diseño de los programas de enseñanza y en la evaluación de la progresión de los estudiantes en la utilización y comprensión de modelos interpretativos próximos a los científicos (Guisasola, Zuza, Ametller y Gutiérrez-Berraondo, 2017; Hernández et al., 2012).

El objetivo de este trabajo de revisión es contribuir al conocimiento de las principales dificultades en el aprendizaje del MCS, a nivel introductorio, y cómo enseñarlo. Por lo tanto, las preguntas de investigación fueron:

1. ¿Qué resultados muestra la investigación en enseñanza de las ciencias sobre las dificultades de los estudiantes de Educación Primaria, Secundaria y primeros cursos de universidad en el aprendizaje del MCS?

2. A partir de este análisis de dificultades a lo largo de la enseñanza, ¿es posible identificar una progresión de aprendizaje sobre el concepto de sonido?

Este artículo, en primer lugar, describe los elementos epistemológicos que definen la estructura del MCS para un nivel educativo de física introductoria. En segundo lugar, se realiza una revisión sistemática y se agrupan los estudios revisados en torno a las tres ideas claves del sonido que emergen del análisis epistemológico previo: 1) naturaleza del sonido y sus propiedades, 2) propagación y 3) modelo de onda. Finalmente, se discuten los resultados a la luz de nuestras preguntas de investigación y se perfilan las implicaciones en la enseñanza-aprendizaje del MCS.

ANÁLISIS EPISTEMOLÓGICO DEL SONIDO EN CURSOS INTRODUCTORIOS DE CIENCIAS

Entendemos que el análisis epistemológico considera la estructura interna del dominio científico específico para informar sobre las características epistémicas en la construcción de ese conocimiento (Chi, 2005). El resultado es un conjunto de componentes conceptuales que deben ser articulados por los estudiantes en un modelo científico (MC). Si tomamos el marco didáctico de Duit et al. (2005), conocido como «Reconstrucción Educativa», el desarrollo del MC incluye la clarificación y comprensión de los contenidos concretos del currículum, y además se toman en consideración las concepciones sobre la ciencia y los procesos de investigación científica. Aunque desde el punto de vista científico la estructura del contenido escolar es más elemental, también es más rica, ya que dicho contenido debe ponerse en contexto para que sea entendido por los estudiantes (Duit et al., 2012).

Hay un consenso en la teoría física a nivel introductorio para definir el sonido como una onda que se genera al vibrar objetos y se propaga a través de un medio de un lugar a otro (Rossing et al., 2001; Knight, 2013; Tipler y Mosca, 2005). Cromer (1981) y Vallejo et al. (2017) consideran que las vibraciones se propagan a través de un medio elástico, que transmite gradualmente un estado de compresión y rarefacción, sin transporte de materia. Como indica Tiberghien (1996), los procesos de modelización desempeñan un papel central en la comprensión de la física al relacionar descripciones de objetos y eventos en el mundo material con el mundo de las teorías y modelos. Para describir el sonido, comprender el modelo de «vibración» supone una abstracción difícil dependiendo del contexto en el que se analiza el sonido. Este modelo de «vibración» lleva a considerar otras características como el movimiento vibratorio y la onda de sonido, su transmisión, velocidad, volumen e intensidad y aislamiento (Rossing et al., 2001; Hernández et al., 2012). Además, los currículos de ciencias de EP y ES incluyen propiedades intrínsecas del sonido, como intensidad, tono y timbre, relacionándolos con otros contextos como educación musical y medio ambiente (Perales, 1997; Macho y Elejalde, 2017; RDL 126/2014, RDL 1105/2014). A pesar de su uso cotidiano, tono y timbre son conceptos complejos y difíciles de entender desde un MCS inicial. Los estudiantes suelen percibir el tono como una sensación subjetiva y no lo entienden como una combinación de frecuencias con las que se emite el sonido (Merino, 1998a). La frecuencia es una magnitud que determina el número de veces que se repite un evento en cada segundo y se mide en hercios (Hz). El timbre es una propiedad percibida por el sistema auditivo que permite distinguir dos sonidos de igual intensidad y tono. Esto significa que el timbre es la correlación subjetiva de todas las propiedades que no interfieren directamente en la intensidad y el tono del sonido, como la densidad espectral o la envoltura del sonido (Rossing et al., 2001). En este sentido, el MCS explícitamente distingue entre: *i*) amplitud y volumen, *ii*) frecuencia y tono, e indica que *iii*) al evaluar la energía acústica es necesario tener en cuenta ambas propiedades (amplitud y frecuencia) y *iv*) que la intensidad, el tono y el timbre son propiedades interdependientes (Wittmann, Steinberg y Redish, 2003).

Un aspecto fundamental en el MCS es comprender que lo que se propaga a través de un medio elástico es la vibración (Hernández, Couso y Pintó, 2011; Wittmann, 2002; Wittmann, Steinberg y Redish, 1999) y que las ondas sonoras son perturbaciones que se propagan en el aire de forma longitudinal. De este modo, las moléculas de aire se desplazan atrás y adelante en la dirección de propagación del sonido, pero se mantienen en su posición de equilibrio sin desplazarse con la onda (Rossing et al., 2001). El caso del sonido y su propagación es un ejemplo paradigmático de proceso emergente. Fazio et al. (2008) describen cómo muchos patrones del mundo natural son el resultado de la interacción de un gran número de pequeñas piezas que se combinan de modos distintos para generar el patrón a gran escala. Este mecanismo se conoce como proceso emergente. En cambio, en los procesos directos, el comportamiento de los componentes son la causa directa del patrón general de flujo como la dirección y la velocidad (Chi, 2005). En la onda humana de un estadio las personas se sientan y se levantan, pero la onda generada en el estadio se traslada en el eje transversal de modo que el movimiento de la onda es muy diferente al de sus partes constituyentes (Rossing et al., 2001).

Tras el análisis de las principales características epistemológicas del MCS, brevemente indicadas en el párrafo anterior, emergen tres ideas clave que van a guiar el análisis de la revisión sistemática de la literatura. A continuación, se exponen las ideas clave y una breve definición de estas:

1. *Naturaleza y propiedades del sonido.* El sonido se define como el evento producido por la vibración de un objeto perturbado mecánicamente por una fuente de energía. Podemos usar las tres propiedades de las vibraciones para caracterizar el sonido: la intensidad, el tono y el timbre de la vibración.
2. *Propagación del sonido.* Las vibraciones se propagan a través de un medio elástico sin transporte de materia. Se trata de un proceso emergente de transferencia de energía donde el comportamiento de las vibraciones es muy diferente al de sus partes constituyentes, ya que las partículas del medio circundante oscilan de un lado a otro sobre su posición de equilibrio.
3. *Modelo de onda.* La propagación de la vibración se modeliza mediante el concepto de onda de presión.

METODOLOGÍA

Las revisiones sistemáticas de la literatura constituyen una herramienta rigurosa y eficiente que permite examinar la literatura científica disponible sobre un aspecto o pregunta de investigación concreta y, por tanto, hacer una síntesis de todos los resultados empíricos relativos a esa pregunta siguiendo cuatro fases: 1) definir los criterios para la búsqueda, 2) caracterizar los artículos que fundamentan la revisión, 3) dar una visión general sobre los artículos y 4) mostrar aspectos específicos de algunos estudios (Hadenfeldt et al., 2014).

Selección de los estudios para la revisión: definición de los criterios de búsqueda

La búsqueda de publicaciones científicas se realizó en todas las bases de datos contenidas en la *Web of Science* (WoS), restringiendo la búsqueda a su colección principal, ERIC y SCOPUS. Los criterios de búsqueda y resultados obtenidos en las bases de datos de la WoS se detallan a continuación:

- a) Se aplicó el motor de búsqueda usando el campo «Topic», para los términos: 1-Sound and «Science Education» y 2-Sound and «Physics Education» sobre el título, resumen y palabras clave de las publicaciones presentes en dicha base de datos, y se limitó a publicaciones entre 1990 y 2018. Esta primera búsqueda produjo un total de 491 (primer motor de búsqueda) y 353 (segundo motor de búsqueda) resultados, respectivamente.

- b) La siguiente etapa de este proceso fue la selección de artículos cuyo título y resumen revelasen que se trataba de estudios de enseñanza/aprendizaje del sonido desde EP a EU en cursos introductorios de ciencias y tecnología. Así, el análisis del título y resumen de los 353 resultados obtenidos con el segundo motor de búsqueda nos permitió acotar la muestra a 68 publicaciones presentes en la WoS. A continuación, se restringió la lista de resultados a los artículos de investigación publicados en inglés o en español, descartando comunicaciones a congresos, capítulos de libro o manuales didácticos. Esto acotó la muestra a 32 artículos.
- c) En el análisis de la literatura seleccionada en la fase a) se siguió un proceso iterativo en el que la lista de referencias de cada artículo se utilizó para buscar nuevas referencias. Esto permitió seleccionar un total de 13 artículos científicos más.

La búsqueda produjo un total de 45 artículos que constituyen la base documental de nuestra revisión.

Caracterización de los estudios seleccionados

Los artículos que se seleccionaron después de aplicar los criterios anteriormente mencionados muestran distintos aspectos de las investigaciones educativas sobre la comprensión del MCS. Para poder responder a las dos preguntas de investigación (es decir, qué aspecto del sonido se investiga y cómo progresa la comprensión sobre el sonido a lo largo de la enseñanza) caracterizamos los estudios basándonos en cuatro características:

1. Nivel educativo: Educación Primaria (EP; 6-12 años), Educación Secundaria (ES; 13-17 años) y cursos introductorios en Educación Superior (EU; >18 años).
2. Característica(s) del MCS abordada(s) en el trabajo empírico: se tuvieron en cuenta las tres ideas clave fundamentadas en el análisis epistemológico: naturaleza del sonido y propiedades, propagación del sonido y modelo de onda.
3. Foco del trabajo empírico: en el aprendizaje. Se seleccionaron tanto los estudios empíricos que describen herramientas o cuestionarios para analizar la comprensión sobre el concepto de sonido (artículos sobre aprendizaje) como aquellos que analizan dicha conceptualización antes y después de alguna intervención didáctica.
4. Tamaño muestral: se registró el número de participantes de cada estudio para valorar su alcance.

En la sección de resultados se describen, de forma cualitativa, los principales resultados de los 45 artículos (véase anexo 1) y, finalmente, se presentan las implicaciones para la enseñanza-aprendizaje del MCS.

RESULTADOS

Revisión de la literatura

La figura 1 muestra la distribución de los 45 artículos del Anexo 1 agrupados por nivel educativo y característica del sonido estudiada. Al haber artículos que cumplen más de un criterio de clasificación, la suma total que aparece en la figura 1 es superior a 45.

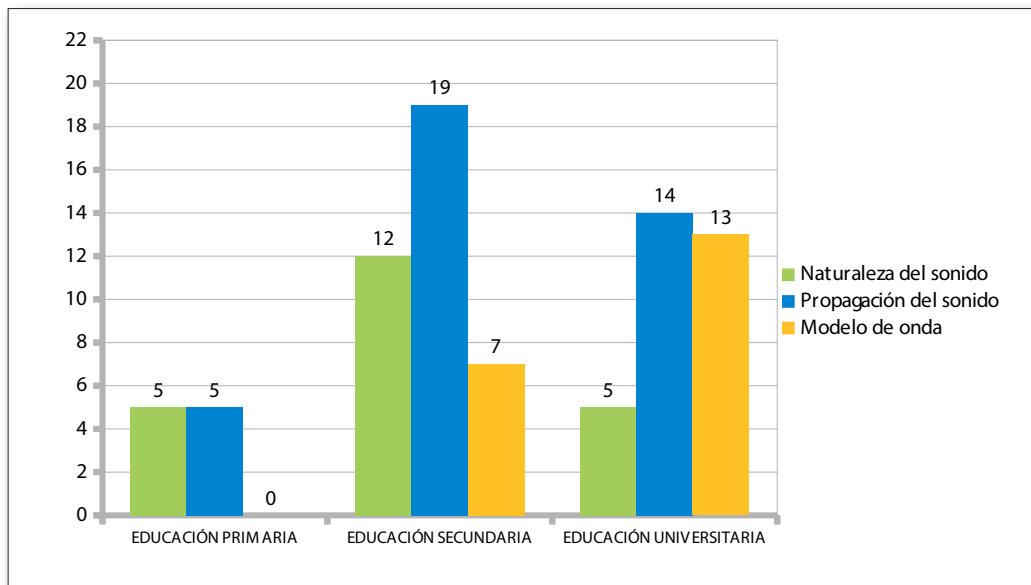


Fig. 1. Distribución de los 45 estudios analizados agrupados por nivel educativo e ideas claves sobre el sonido.

La figura 1 muestra que el grupo menos representado en la bibliografía fue el nivel de EP ($n = 10$), siendo la naturaleza del sonido y su propagación los aspectos más estudiados en este nivel educativo ($n = 5$). También se puede apreciar el predominio de los estudios dirigidos a comprender las dificultades del alumnado de ES y EU sobre la propagación del sonido ($n = 19$ y $n = 14$, respectivamente), seguido por estudios sobre el modelo de onda en EU ($n = 13$).

En las secciones siguientes se presenta un resumen de los principales resultados sobre dificultades para cada idea clave del MCS y cada etapa educativa estudiada.

Dificultades en la comprensión de la naturaleza del sonido y sus propiedades

En la EP, algunos autores han observado que la asociación entre vibración de un objeto y producción de sonido es dependiente del contexto. Por ejemplo, Barman y colaboradores (1996) estudiaron las concepciones sobre el sonido en alumnado de 10 y 11 años antes y después de una instrucción centrada en el estudiante y dividida en un «ciclo de aprendizaje» basado en tres fases (exploración, introducción y aplicación del concepto). El análisis de las respuestas mostró que todos los estudiantes ($n = 34$) percibían el sonido como un «objeto que se mueve de un lugar a otro» o «rebotando de distintos objetos». Aunque podían utilizar el término *vibración*, no eran capaces de describir la fuente del sonido o cómo las vibraciones se relacionan con el sonido, ni tampoco explicar la absorción o reflejo del sonido. Después de la instrucción, Barman et al. (1996) encontraron que la comprensión mejoró en mayor medida en aquellos que recibieron la enseñanza siguiendo el ciclo de aprendizaje. Asimismo, en la etapa de EP también se aprecia una tendencia mayoritaria a dotar de atributos materiales al sonido. Mazens y Lautrey (2003) estudiaron las concepciones del alumnado de 6 a 10 años y establecieron cuatro modelos mentales del sonido basados en la sustancialidad, que reflejan una evolución gradual y jerárquica desde una concepción del sonido con propiedades materiales a una concepción como vibración. De acuerdo con la edad de los estudiantes, las propiedades *peso* y *permanencia* fueron las primeras en ser abandonadas y *sustancialidad* fue la más resistente al cambio y, por tanto, central en la organización del conocimiento inexperto de los estudiantes (Lautrey y Mazens, 2004; Mazens y Lautrey, 2003).

En la ES, el alumnado sigue presentando problemas con el fenómeno vibratorio a la hora de describir el sonido. Así, aunque sepan que se produce una vibración, no pueden determinar con claridad qué componentes son los que vibran (Treagust et al., 2001). Houle y Barnett (2008) utilizaron el contexto de la comunicación entre aves urbanas para instruir sobre la naturaleza del sonido. Estos autores alertaron de que, a pesar de que la comprensión del problema ambiental de contaminación acústica mejoró, el alumnado no mejoró en su comprensión sobre la naturaleza y propiedades del sonido.

En la etapa de ES se suelen abordar las propiedades intrínsecas del sonido, como el tono y la intensidad, que ya son conocidos fenomenológicamente desde una edad temprana. Sin embargo, tal y como alerta Merino (1998b), la temprana modelización matemática y simplificación de la representación del sonido conlleva problemas. En esta etapa, la asociación del sonido con propiedades materiales predomina sobre una asociación más próxima al conocimiento científico (en la que al sonido se le asignarían propiedades de proceso), tal y como muestran los resultados del «Sound Concept Inventory Instrument» realizado por Eshach y colaboradores y aplicado a una gran muestra de estudiantes de secundaria (Eshach, 2014; Eshach et al., 2016, 2018). Así mismo, Sözen y Bolat (2016) desarrollaron un cuestionario para detectar concepciones alternativas con respecto a atributos materiales del sonido, a las propiedades del sonido (tono e intensidad) y su relación con los instrumentos musicales, la necesidad de un medio en la propagación del sonido y su velocidad. Estos autores encontraron que el aprendizaje logrado está muy lejos de las expectativas de logro del currículum de ES.

En cuanto al nivel de EU, se observa que muchas concepciones alternativas detectadas en los estudiantes de EP y ES se mantienen en estudiantes universitarios: atribución de propiedades materiales, dificultad de identificar la fuente vibratoria y confusión entre tono e intensidad. De hecho, las concepciones alternativas mostradas por estudiantes universitarios para el grado en profesorado de ES de Turquía (Bolat y Sözen, 2009) son muy similares a las detectadas en el alumnado de ES (Sözen y Bolat, 2016).

Küçüközer (2009), en su estudio con 56 estudiantes universitarios del grado de profesorado de ES, muestra cómo el contexto influye en la capacidad de identificar la producción de sonido con la fuente vibratoria. Así, ante la pregunta «Explica cómo se produce el sonido cuando se golpean dos piedras, se rasga una guitarra o se golpea un tambor», solo el 14 % de los participantes pudo relacionar la producción de sonido con la vibración de la fuente en todos los casos, siendo el contexto más habitual el rasgueo de la guitarra y el menos frecuente el golpe entre dos piedras.

En respuesta a la persistencia de dificultades y concepciones alternativas en formación de profesorado, se ha planteado el uso de contextos STEM para mejorar el aprendizaje del sonido con resultados dispares. El estudio de Awad y Barak (2018) mostró que este alumnado tenía dificultades en comprender la relación entre las propiedades intrínsecas del sonido y la forma en cómo lo oímos, a pesar de mejorar otros aspectos relacionados con el problema estudiado. En cambio, Yalçın et al. (2017) mostraron que si al profesorado en formación se le presentaban situaciones interesantes que le permitiera relacionar el sonido con la vida cotidiana, la comprensión del sonido como «vibración» y sus propiedades de timbre y tono mejoraban.

Dificultades en la comprensión de la propagación del sonido

Como hemos indicado anteriormente (figura 1, anexo 1), el estudio sobre las dificultades para entender la propagación del sonido es un tema recurrente en las investigaciones, siendo los estudios en ES predominantes en la bibliografía. Además, muchos de estos trabajos incorporan y evalúan propuestas de enseñanza para mejorar las concepciones y modelos iniciales del alumnado (Awad y Barak, 2018; Çalik, Okur y Taylor, 2011; Fazio et al., 2008; Hernández et al., 2011; Hernández, Couso y Pintó, 2015; Houle y Barnett, 2008; Okur y Artun, 2016; Vallejo et al., 2017; West y Wallin, 2013).

Fazio y colaboradores (2008) mostraron que los estudiantes de ES que tenían una concepción «material» del sonido consideraban que su propagación era realizada por las moléculas del medio que lo transportaban de una a otra. Resultados similares fueron obtenidos por Caleon y Subramaniam (2010) usando un cuestionario de opción múltiple de tres niveles (conocimiento conceptual, explicativo y nivel de confianza en la respuesta). Estos autores encontraron que los estudiantes no entendían el papel que juega el medio en un MC de propagación del sonido. Un porcentaje significativo de los estudiantes les atribuían a las moléculas del medio la capacidad de transportar el sonido como si fuera un objeto.

Existe un consenso sobre las dificultades que entraña adoptar un modelo correcto de propagación del sonido, si no se realiza un cambio ontológico de la propagación, lo que requiere su comprensión como un proceso emergente y no directo (Eshach, 2014; West y Wallin, 2013). West y Wallin (2013) aportan ejemplos de explicaciones «materiales»: «El sonido puede pasar a través del vacío, pero no puede pasar a través de líquidos o sólidos»; «Si pasa por sólidos lo hace a través de los huecos»; «Las vibraciones golpean a los átomos/partículas». Además, hay que tener en cuenta que, en el caso de las ondas mecánicas, a menudo, el proceso emergente (el proceso a gran escala) es confundido por los estudiantes con los procesos directos (el movimiento de las partes constituyentes del patrón) (Chi, 2005; Volfson et al., 2018; West y Wallin, 2013).

El rol del aire como único medio de propagación (que resta importancia a la elasticidad del medio o la propagación en el vacío) es otra de las ideas recurrentes que aparecen en numerosos estudios centrados en ES (Hernández et al., 2012; Saura y de Pro, 1999). Así mismo, es frecuente encontrar explicaciones que relacionen la frecuencia o la intensidad del sonido con la velocidad de propagación (Caleon y Subramaniam, 2010; Fazio et al., 2008; Hrepic et al., 2010).

Otro aspecto relacionado con la propagación del sonido es su dirección. Boyes y Stanisstreet (1991) examinaron las concepciones de los estudiantes de ES al analizar la trayectoria del sonido entre una fuente y un receptor. Los resultados mostraron que solo el 40 % del alumnado más joven (11-13 años) y el 78 % de los mayores (13-16 años) indicaron que el sonido viaja de la fuente al oyente. Los autores encontraron que un porcentaje significativo de estudiantes indicaban erróneamente una dirección «inversa» del movimiento del sonido desde el oyente a la fuente. Resultados similares fueron obtenidos por Saura y de Pro (1999).

Diversos investigadores proponen el estudio de las vibraciones producidas en una cuerda como analogía para comprender la propagación de las ondas mecánicas. En general, estas investigaciones han mostrado que la concepción alternativa que más prevalece es que la velocidad de propagación en la cuerda depende de la fuerza con la que se aplique el pulso (Tongchai et al., 2009; Viennot, 2004).

Hernández et al. (2012) indagaron en las dificultades y concepciones que presentaba el alumnado de ES sobre la atenuación del sonido, y observaron que estas dependían del papel que los estudiantes atribuyen a la estructura interna y a las propiedades de los materiales. Así, la misma propiedad material puede concebirse como facilitadora u obstáculo para absorber o reflejar el sonido, dependiendo del modelo que tenga el estudiante sobre la atenuación del sonido. Si el estudiante cree que la atenuación se debe a que el material ejerce de barrera, entonces los mejores aislantes serían los densos y no porosos. Este estudio sobre dificultades también confirmó lo que otros estudios previos habían alertado en estudiantes de EU (Linder, 1993): la simplificación del rol de la densidad de los materiales y su microestructura en la propagación del sonido, entendida la densidad únicamente como dependiente de la distancia entre las partículas y no de la masa y el empaquetado de estas.

Hrepic et al. (2010) identificaron que los estudiantes en EU explicaban la propagación del sonido desde el modelo correcto de onda a modelos intermedios de «entidad» y onda o exclusivamente de «entidad». En el modelo alternativo de «entidad», que es mayoritario, el sonido es una unidad independiente del medio por el que viaja. Asimismo, alertaron sobre las dificultades de los estudiantes al

analizar el papel del contexto en la propagación del sonido. Un mismo estudiante podía afirmar que el «sonido empuja a las partículas del aire, pero no a las de la pared».

Dificultades en la comprensión del modelo de onda

Las dificultades en describir las propiedades ondulatorias del sonido se han estudiado en mayor medida en la EU (figura 1). El modelo ondulatorio del sonido corresponde a una fase de profundización en la comprensión del sonido y se enseña en niveles introductorios de EU, pero también está en el currículum de ES en el tramo de estudiantes de 16-18 años. Por ello, extraña la poca investigación en ES ($n = 8$, figura 1).

Saura y de Pro (1999) analizaron los esquemas mentales de los estudiantes de ES con respecto a las magnitudes ondulatorias. Estos autores observaron que, a pesar de albergar un conocimiento intuitivo de lo que son las ondas, persistían las confusiones entre frecuencia y velocidad de propagación, entre la amplitud y la frecuencia, o entre amplitud y longitud de onda. Con el objeto de mejorar la comprensión del modelo de onda, existen propuestas de enseñanza reforzadas con el uso de TIC que muestran resultados interesantes (Leccia et al., 2015; Vallejo et al., 2017). En la propuesta de Vallejo et al. (2017), se guía al alumnado, mediante procesos inductivos y deductivos, a navegar entre registros gráficos y aritméticos de ondas sonoras cuando estudian el tono como cualidad del sonido y lo relacionan con variables de frecuencia y período. Con respecto a la utilización correcta del modelo de onda, antes de la intervención educativa la mayoría de los estudiantes (70-80 %) usaron representaciones inadecuadas que asocian el sonido a algo exclusivamente audible. Tras el refinamiento de la propuesta didáctica, el 71 % de los estudiantes modificaron sus representaciones sobre la propagación del sonido donde la señal sinusoidal incluye elementos de significado como el tiempo y el número de ciclos de una onda.

Diversos autores han mostrado que incluso graduados de Física mostraban confusión con el modelo de onda y representaban el sonido como una onda transversal (Grayson y Donnelly, 1996; Kennedy y De Bruyn, 2011; Linder, 1992). De hecho, Linder (1992) argumentaba que la representación del sonido en libros de texto no solo podía crear confusión, sino que es inadecuada, ya que el sonido se representa como una onda sinusoidal. Sin embargo, y aunque esta representación pueda ser útil para analizar las magnitudes de las ondas, no ayuda a visualizar el hecho de que el sonido se propaga como una onda de presión. Houle y Barnett (2008), en su propuesta de enseñanza mediante TIC y un contexto medioambiental, utilizaron explícitamente el muelle *linky* (juguete consistente en un muelle helicoidal y módulo elástico muy bajo) como analogía para mostrar la propagación de ondas de compresión y ondas transversales incluyendo la medida de longitud de onda y amplitud. Sin embargo, no parece que el uso de este modelo ayudara a la posterior habilidad de reconocer e interpretar representaciones matemáticas del sonido. Otros trabajos han mostrado que el uso de analogías que combinan representaciones concretas y abstractas mejora la comprensión de conceptos de física, como es el caso de las ondas de sonido (Podolefsky y Finkelstein, 2007). De hecho, Tongchai y colaboradores (2011), en su análisis del uso de modelos conceptuales para resolver cuestiones sobre ondas de sonido, descubrieron que el estudio de ondas en otros contextos más abstractos (por ejemplo, mecánica cuántica o electromagnetismo) ayudó a reforzar la comprensión de ondas más concretas como las mecánicas.

Un estudio ampliamente citado de las dificultades que supone representar el sonido usando el modelo de onda en EU es el de Hrepic y colaboradores (2010). Estos investigadores identificaron los modelos iniciales de estudiantes de física introductoria. Así, mostraron que solo un 13 % dio explicaciones coherentes con el modelo de onda aceptado científicamente. Los autores describieron que la mayoría de los estudiantes presentaban el modelo «entidad», o bien modelos ingenuos como el denominado «temblor» que considera que el sonido es una entidad que se propaga a través del medio, causando una vibración longitudinal en las partículas del medio.

Bolat y Sözen (2009) estudiaron el conocimiento sobre conceptos relacionados con el sonido de EU en el grado de profesorado de EP. Si atendemos a la naturaleza ondulatoria/vibratoria del sonido, estos autores observaron que el alumnado no comprende que el sonido es una onda longitudinal, que las ondas sonoras producen alteraciones de presión o que el sonido es una forma de energía. Además, comprobaron que las y los estudiantes no pudieron establecer relaciones entre la frecuencia del sonido y su longitud de onda y periodo, entre el tono del sonido y su(s) frecuencia(s), así como entre la intensidad del sonido y la amplitud.

DISCUSIÓN E IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA

El objetivo general de esta revisión ha sido analizar los resultados de la investigación de las últimas décadas sobre la comprensión del MCS en el alumnado de diferentes etapas educativas. A continuación, comentaremos las aportaciones de la revisión a las dos preguntas de investigación.

Pregunta de Investigación 1

Nuestra revisión ha mostrado que hay suficientes estudios para identificar las principales dificultades y concepciones alternativas sobre el sonido en distintas etapas educativas. Es cierto también que muchos estudios se centran en una etapa concreta y en una única característica clave del sonido. En general, abundan los estudios destinados a indagar en las dificultades para comprender la propagación del sonido, fundamentalmente en las etapas de ES y EU.

A) En relación con la primera idea clave, es decir, la naturaleza del sonido, la revisión ha mostrado que el alumnado de los diferentes niveles educativos presenta una alta dificultad para entender que el sonido se origina por la vibración de un objeto y que esta se propaga a través de un medio elástico. Esto lleva a que la investigación recomiende ayudar al alumnado a descartar/modificar la concepción de que el sonido es una entidad material que «surge» de algún sitio y se transporta. Los diferentes estudios revisados muestran también la confusión entre las propiedades del sonido y las magnitudes del modelo de onda (Merino, 1998b; Sözen y Bolat, 2016; Vallejo et al., 2017). En consecuencia, la literatura resalta la importancia de una enseñanza que explicita las propiedades del sonido y su relación con el fenómeno vibratorio antes de entrar a relacionar estas propiedades con las magnitudes de onda (Linder, 1993; Perales, 1997; Podolefsky y Finkelstein, 2007; Sözen y Bolat, 2016).

Prácticamente todos los estudios revisados sobre las dificultades en el aprendizaje de la naturaleza del sonido muestran que la mayoría del alumnado de EP y ES, así como porcentajes significativos del alumnado de EU, presenta concepciones «materialistas» del sonido (Hrepic et al., 2010; Volfson et al., 2018). Para niveles de ES y EU, Eshach et al. (2016) sugieren que trabajar la naturaleza «no material» del sonido debería ser el punto de inicio de la instrucción, ya que está relacionada con fenómenos tan materiales como la presión y densidad del medio.

B) En relación con la segunda idea clave, la propagación del sonido, la robustez y permanencia a lo largo del tiempo de las concepciones «materialistas» lleva a los estudiantes a explicar cualitativamente el fenómeno físico de modo incorrecto (Eshach et al., 2018), incluso en la EU, cuando el modelo de onda se ha incorporado en sus concepciones y están dotados de un aparato matemático para resolver ecuaciones de onda (Hrepic et al., 2010; Linder, 1993). Junto a estas concepciones «materialistas», la literatura muestra una serie de dificultades o confusiones respecto a qué factores afectan a la velocidad de propagación, como la fuente vibratoria (Tongchai et al., 2009; Viennot, 2004), o la densidad de los materiales sin tener en cuenta su elasticidad o el empaquetamiento de las partículas (Hernández et al., 2012). En EU, estos modelos erróneos pueden emerger en entrevistas o preguntas abiertas y pueden

quedar enmascarados en problemas o cuestionarios cerrados que sean de aplicación directa de fórmula y hayan sido respondidos satisfactoriamente (Hrepic et al., 2010; Linder, 1993).

C) En cuanto a la tercera idea clave, la comprensión del modelo de onda para representar el sonido, las investigaciones se han realizado fundamentalmente en la ES postobligatoria y en la EU. Estas investigaciones muestran que no parece haber una clara conexión entre los fenómenos sonoros y el modelo de onda, que exige una alta abstracción matemática (Merino, 1998b). Linder (1992; 1989) también alertó que, incluso en la mayoría de los graduados de física, el modelo de onda sinusoidal no era utilizado correctamente para explicar fenómenos sonoros. En formación de profesorado, la literatura ha mostrado que este alumnado no es capaz de establecer relaciones entre las propiedades intrínsecas del sonido y las magnitudes de onda (Bolat y Sözen, 2009).

Pregunta de Investigación 2

Si atendemos a la segunda pregunta de investigación, el análisis y categorización de las concepciones del alumnado de las diferentes etapas educativas respecto del MCS, nos muestra que a pesar de que las investigaciones muestran un mayor aprendizaje conforme se avanza en las etapas educativas, la progresión es escasa y la mayoría de los estudiantes sigue teniendo dificultades en aprender un MC sobre la naturaleza del sonido, su propagación y más aún el modelo de onda. Los resultados quedan lejos de las expectativas de aprendizaje señaladas en el currículum y no parece que haya una progresión significativa del aprendizaje. Estos resultados nos alertan sobre la forma de enseñanza tradicional del sonido y sus aplicaciones.

Los estudios revisados coinciden en analizar unos contenidos concretos para cada nivel educativo. Así, en EP los contenidos de aprendizaje tratados se centran en algunos aspectos de la naturaleza del sonido y de propagación a nivel fenomenológico. En la ES los contenidos tratados profundizan en las propiedades de la naturaleza del sonido, así como en su propagación e introducen, al final de la ES, el modelo de onda. En la EU se tratan contenidos relacionados con la naturaleza ondulatoria del sonido y el modelo de onda.

La revisión nos ha permitido perfilar una graduación de las dificultades de aprendizaje que, junto con el esquema del contenido que hay que enseñar, contribuyen a esbozar una PA basada en la integración sistemática de los resultados de investigación (Duschl et al., 2011; Duncan y Hmelo-Silver, 2009; figura 2). En este sentido, las investigaciones revisadas han mostrado que las dificultades de aprendizaje van acompañadas de la existencia de modelos explicativos en los estudiantes de diferentes etapas educativas que coinciden en relacionar la PA con un cambio ontológico en el MCS. Así, los modelos explicativos sufren cambios ontológicos, desde una concepción «sustancialista» del sonido, pasando por una visión de transmisión del sonido como proceso directo, hasta entender la transmisión como proceso emergente en el modelo de onda (Hrepic et al., 2010; Mazens y Lautrey, 2003; West y Wallin, 2013; figura 2).



Fig. 2. Esquema de dificultades de aprendizaje y progresión en el MCS por etapa educativa.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES PARA LA ENSEÑANZA

Esta revisión sistemática de dificultades sobre el MCS sugiere que los estudiantes se mueven a lo largo de una secuencia de niveles de comprensión hacia un modelo más complejo del sonido como onda y que integra sus características principales. El estudio de las dificultades permite identificar el estado de comprensión de un estudiante al detallar qué tipo de dificultades puede tener y cuáles son los siguientes niveles a alcanzar para avanzar en una comprensión del MCS. Además, este trabajo puede servir como marco teórico para diseñar secuencias de enseñanza que tengan en cuenta las dificultades de aprendizaje de los estudiantes y su nivel de comprensión del MCS (Duit et al., 2012).

En cuanto a las limitaciones de la revisión, cabe destacar el menor número de artículos para la etapa de EP frente a etapas más avanzadas, lo que limita parcialmente las implicaciones para la enseñanza en este rango de edad.

En cuanto a las implicaciones de enseñanza del sonido, el trabajo de Hrepic et al. (2010) muestra cómo el lenguaje ambiguo que se usa en las clases de ciencias ha podido contribuir a reforzar ideas que representan el sonido como una sustancia. Una palabra que tome distintas acepciones semánticas, las cuales pueden pertenecer a diferentes categorías ontológicas, puede dificultar el aprendizaje y promover concepciones erróneas (Hrepic et al., 2010).

Linder (1992) y posteriormente Eshach et al. (2016) también alertan sobre el uso de analogías, ya que puede reforzar concepciones erróneas en el alumnado (Taber, 2015). Ejemplos de ello serían el uso trivial del muelle *slinky* (Houle y Barnett, 2008) o, al describir el sonido como una onda mecánica, considerar que la dirección de propagación de esta es transversal. Así mismo, la operativización del modelo de onda con lenguaje matemático en etapas superiores de ES o EU no tiene por qué ayudar a conceptualizar el sonido como onda mecánica de presión, si no se acompaña de un significado físico del fenómeno (Leccia et al., 2015; Linder, 1992; Merino, 1998b; Saura y de Pro, 1999; Vallejo et al., 2017).

Las propuestas mencionadas coinciden en afirmar que, para que el alumnado vea más atractiva y fructífera la concepción científica que la espontánea, estos han de tener oportunidades, reiteradas y duraderas, de poner en práctica procedimientos y criterios de prueba y aceptación, característicos del

trabajo científico, es decir, de involucrarse –en la medida de lo posible– en la «práctica científica». En esta orientación, la construcción de conocimientos no se plantea como un cuestionamiento de las ideas de los alumnos, sino como resultado de las investigaciones realizadas para resolver problemas (Houle y Barnett, 2008; Vallejo et al., 2017; West y Wallin, 2013).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Awad, N. y Barak, M. (2018). Pre-service science teachers learn a science, technology, engineering and mathematics (STEM)-oriented program: the case of sound, waves and communication systems. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(4), 1431-1451.
<https://doi.org/10.29333/ejmste/83680>
- Barman, C. R., Barman, N. S. y Miller, J. A. (1996). Two teaching methods and students' understanding of sound. *School Science and Mathematics*, 96(2), 63-67.
<https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1996.tb15812.x>
- Bolat, M. y Sözen, M. (2009). Knowledge levels of prospective science and physics teachers on basic concepts on sound (sample for Samsun city). *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 1(1), 1231-1238.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2009.01.220>
- Boyes, E. y Stanisstreet, M. (1991). Development of pupils' ideas about seeing and hearing--the path of light and sound. *Research in Science and Technological Education*, 9(2), 223-244.
<https://doi.org/10.1080/0263514910090209>
- Caleon, I. y Subramaniam, R. (2010). Development and application of a three-tier diagnostic test to assess secondary students' understanding of waves. *International Journal of Science Education*, 32(7), 939-961.
<https://doi.org/10.1080/09500690902890130>
- Çalik, M., Okur, M. y Taylor, N. (2011). A comparison of different conceptual change pedagogies employed within the topic of «sound propagation». *Journal of Science education and Technology*, 20(6), 729-742.
<https://doi.org/10.1007/s10956-010-9266-z>
- Chang, H. P., et al. (2007). Investigating primary and secondary students' learning of physics concepts in Taiwan. *International Journal of Science Education*, 29(4), 465-482.
<https://doi.org/10.1080/09500690601073210>
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199.
https://doi.org/10.1207/s15327809jls1402_1
- Cromer, A. H. (1981). *Física para las ciencias de la vida* (2.ª ed.). Reverte.
- Duit, R., Gropengießer, H. y Kattmann, U. (2005). Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction. En H. E. Fischer (Ed.), *Developing standards in research on science education* (pp. 1-9). Taylor and Francis.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. y Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction – a framework for improving teaching and learning science. En D. Jorde y J. Dillon (Eds.), *Science Education Research and Practice in Europe: Retrospective and Prospective* (pp. 13-37). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-6091-900-8_2

- Duncan, R. G. y Hmelo-Silver, C. E. (2009). Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 606-609.
<https://doi.org/10.1002/tea.20316>
- Duschl, R., Maeng, S. y Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2011.604476>
- Eshach, H. (2014). Development of a student-centered instrument to assess middle school students' conceptual understanding of sound. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(1), 010102.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.010102>
- Eshach, H., Lin, T. C. y Tsai, C. C. (2016). Taiwanese Middle School Students' Materialistic Concepts of Sound. *Physical Review Physics Education Research*, 12(1).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010119>
- Eshach, H., Lin, T. C. y Tsai, C. C. (2018). Misconception of sound and conceptual change: A cross-sectional study on students' materialistic thinking of sound. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(5), 664-684.
<https://doi.org/10.1002/tea.21435>
- Eshach, H. y Schwartz, J. L. (2006). Sound Stuff? Naïve materialism in middle-school students' conceptions of sound. *International Journal of Science Education*, 28(7), 733-764.
<https://doi.org/10.1080/09500690500277938>
- Fazio, C., Guastella, I., Sperandio-Mineo, R. M. y Tarantino, G. (2008). Modeling Mechanical Wave Propagation: Guidelines and experimentation of a teaching-learning sequence. *International Journal of Science Education*, 30(11), 1491-1530.
<https://doi.org/10.1080/09500690802234017>
- Gotwals, A. W. y Anderson, C. W. (2015). Learning Progressions. En R. Gunstone (Ed.), *Encyclopedia of Science Education* (pp. 596-601). Dordrecht: Springer.
- Grayson, D. J. y Donnelly, D. (1996). Using Education research to develop waves courseware. *Computers in Physics*, 10(30).
<https://doi.org/10.1063/1.4822353>
- Guisasola, J., Zuza, K., Ametller, J. y Gutiérrez-Berraondo, J. (2017). Evaluating and redesigning teaching learning sequences at the introductory physics level. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020139.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020139>
- 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>
- Hernández, M., Couso, D. y Pintó, R. (2011). Teaching acoustic properties of materials in secondary school: Testing sound insulators. *Physics Education*, 46(5), 559.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/46/5/008>
- Hernández, M., Couso, D. y Pintó, R. (2012). The analysis of students' conceptions as a support for designing a teaching/learning sequence on the acoustic properties of materials. *Journal of Science Education and Technology*, 21(6), 702-712.
<https://doi.org/www.jstor.org/stable/41674498>
- Hernández, M., Couso, D. y Pintó, R. (2015). Analyzing students' learning progressions throughout a teaching sequence on acoustic properties of materials with a model-based inquiry approach. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 356-377.
<https://doi.org/10.1007/s10956-014-9503-y>

- Houle, M. E. y Barnett, G. M. (2008). Students' conceptions of sound waves resulting from the enactment of a new technology-enhanced inquiry-based curriculum on urban bird communication. *Journal of Science Education and Technology*, 17(3), 242-251.
<https://doi.org/10.1007/s10956-008-9094-6>
- Hrepic, Z., Zollman, D. A. y Rebello, N. S. (2010). Identifying students' mental models of sound propagation: The role of conceptual blending in understanding conceptual change. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 6(2), 020114.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020114>
- Kennedy, E. M. y de Bruyn, J. R. (2011). Understanding of mechanical waves among second-year physics majors. *Canadian Journal of Physics*, 89(11), 1155-1161.
<https://doi.org/10.1139/p11-113>
- Knight, R. D. (2013). *Physics for scientists and engineers: a strategic approach with modern physics*. Pearson Higher Ed.
- Küçüközer, A. (2009). Prospective science teachers' understanding of sound. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 1(1), 1889-1894.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2009.01.332>
- Lautrey, J. y Mazens, K. (2004). Is children's naive knowledge consistent? A comparison of the concepts of sound and heat. *Learning and Instruction*, 14(4), 399-423.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.011>
- Leccia, S. et al. (2015). Teaching about mechanical waves and sound with a tuning fork and the Sun. *Physics Education*, 50(6), 677.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/50/6/677>
- Linder, C. J. (1992). Understanding sound: So what is the problem? *Physics Education*, 27(5), 258.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/27/5/004>
- Linder, C. J. (1993). University physics students' conceptualizations of factors affecting the speed of sound propagation. *International Journal of Science Education*, 15(6), 655-662.
<https://doi.org/10.1080/0950069930150603>
- Linder, C. J. y Erickson, G. L. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, 11(5), 491-501.
<https://doi.org/10.1080/0950069890110502>
- Macho, E. y Elejalde, M. (2017). ¿Por qué, a veces, no entiendo? *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 89, 62-67.
- Mazens, K. y Lautrey, J. (2003). Conceptual change in physics: children's naive representations of sound. *Cognitive Development*, 18(2), 159-176.
[https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(03\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(03)00018-2)
- Merino, J. M. (1998a). Complexity of pitch and timbre concepts. *Physics Education*, 33, 105.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/33/2/015>
- Merino, J. M. (1998b). Some difficulties in teaching the properties of sounds. *Physics Education*, 33(2), 101-104.
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/33/2/014>
- National Research Council (2007). *Taking Science to School: Learning and Teaching Science in Grades K-8*. Washington DC: The National Academies Press.
- National Research Council (2013). *Adapting to a Changing World: Challenges and Opportunities in Undergraduate Physics Education*. Washington DC: The National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/18312>
- Okur, M. y Artun, H. (2016). Secondary students' opinions about sound propagation. *European Journal of Education Studies*, 2(2), 44-62. <https://oapub.org/edu/index.php/ejes/article/view/191>

- Perales, F. J. (1997). Escuchando el sonido: Concepciones sobre acústica en alumnos de distintos niveles educativos. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), 233-248.
- Podolefsky, N. S. y Finkelstein, N. D. (2007). Analogical scaffolding and the learning of abstract ideas in physics: Empirical studies. *Physics Education Research*, 3, 020104-1-16.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.3.020104>
- Real Decreto-ley 126/2014, de 28 de febrero, por el que se establece el currículo básico de la Educación Primaria.
- Real Decreto-ley 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.
- Rossing, T. D., Moore, R. F. y Wheeler, P. (2001). *The Science of Sound* (3.^a ed.). San Francisco: Addison-Wesley.
- Saura, O. y de Pro, A. (1999). ¿Utilizan los alumnos esquemas conceptuales en la interpretación del sonido? *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), 193-210.
- Sözen, M. y Bolat, M. (2011). Determining the misconceptions of primary school students related to sound transmission through drawing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 15, 1060-1066.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.03.239>
- Sözen, M. y Bolat, M. (2016). Developing an achievement test for the subject of sound in science education. *Journal of Education and Learning*, 5(2), 149.
<https://doi.org/10.5539/jel.v5n2p149>
- Taber, K. S. (2015). Alternative Conceptions/Frameworks/Misconceptions. En R. Gunstone (Ed.), *Encyclopedia of Science Education* (pp. 37-41). Dordrecht: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-2150-0_88
- Tiberghien, A. (1996). Construction of prototypical situations in teaching the concept of energy. En G. Welford, J. Osborne y P. Scott (Eds.), *Research in science education in Europe. Current issues and themes* (pp. 100-114). Palmer Press.
- Tipler, P. A. y Mosca, G. (2004). *Física para la ciencia y la tecnología*. I. Reverte.
- Tongchai, A., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Arayathanitkul, K. y Soankwan, C. (2009). Developing, evaluating and demonstrating the use of a conceptual survey in mechanical waves. *International Journal of Science Education*, 31(18), 2437-2457.
<https://doi.org/10.1080/09500690802389605>
- Tongchai, A. et al. (2011). Consistency of students' conceptions of wave propagation: findings from a conceptual survey in mechanical waves. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 7(2), 020101.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.020101>
- Treagust, D. F., Jacobowitz, R., Gallagher, J. L. y Parker, J. (2001). Using assessment as a guide in teaching for understanding: A case study of a middle school science class learning about sound. *Science Education*, 85(2), 137-157.
[https://doi.org/10.1002/1098-237X\(200103\)85:2<137::AID-SCE30>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1098-237X(200103)85:2<137::AID-SCE30>3.0.CO;2-B)
- Vallejo, C. A. C., Araque, F. Y. V. y Uribe, A. M. (2017). Actividades didácticas para el tono como cualidad del sonido, en cursos de física del nivel básico, mediadas por la tecnología digital. *Enseñanza de las Ciencias*, 35(3), 129-150.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2091>
- Viennot, L. (2004). Common reasoning about sound. En *Reasoning in Physics* (pp. 141-151). Dordrecht: Springer.
https://doi.org/10.1007/0-306-47636-3_9

- Volfson, A., Eshach, H. y Ben-Abu, Y. (2018). Development of a diagnostic tool aimed at pinpointing undergraduate students' knowledge about sound and its implementation in simple acoustic apparatuses' analysis. *Physical Review Physics Education Research*, 14(2), 020127.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.020127>
- von Aufschnaiter, C. y Rogge, C. (2015). Conceptual change in learning. En R. Gunstone (Ed.), *Encyclopedia of Science Education* (pp. 209-218). Dordrecht: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-2150-0_99
- West, E. y Wallin, A. (2013). Students' learning of a generalized theory of sound transmission from a teaching-learning sequence about sound, hearing and health. *International Journal of Science Education*, 35(6), 980-1011.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2011.589479>
- Wittmann, M. C. (2002). The object coordination class applied to wave pulses: Analysing student reasoning in wave physics. *International Journal of Science Education*, 24(1), 97-118.
<https://doi.org/10.1080/09500690110066944>
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. y Redish, E. (1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The Physics Teacher*, 37(1), 15-21.
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. y Redish, F. R. (2003). Understanding and affecting student reasoning about sound waves. *International Journal of Science Education*, 25(8), 991-1013.
<https://doi.org/10.1080/09500690305024>
- Yalçın, S. A., Yalçın, P., Akar, M. S. y Sağırli, M. Ö. (2017). The effect of teaching practices with real life content in light and sound learning areas. *Universal Journal of Educational Research*, 5(9), 1621-1631.
<https://doi.org/10.13189/ujer.2017.050920>

Anexo 1. Lista de artículos seleccionados en la revisión sistemática

Estudio	n.º de participantes	Etapa educativa ^a	Idea clave del sonido		
			Naturaleza y propiedades	Propagación	Modelo de onda
Awad y Barak, 2018	60	EU	X	X	
Barman et al., 1996	34	EP	X		
Bolat y Sözen, 2009	92	EU	X	X	X
Boyes y Stanisstreet, 1991	1901	ES		X	
Caleon y Subramaniam, 2010	243	ES			X
Çalik et al., 2011	80	EP		X	
Chang et al., 2007	13.000	EP, ES		X	
Eshach, 2014	355	ES	X		
Eshach et al., 2016	732	ES	X		
Eshach et al., 2018	717	ES, EU	X	X	
Eshach y Schwartz, 2006	10	ES		X	
Fazio et al., 2008	75	ES		X	
Grayson y Donnelly, 1996	54	EU, EU			X
Hernández et al., 2011	--	ES		X	
Hernández et al., 2012	72	ES		X	
Hernández et al., 2015	29	ES		X	
Houle y Barnett, 2008	100	ES	X	X	X
Hrepic et al., 2010	23	EU		X	X
Kennedy y De Bruyn, 2011	25	EU			X
Küçüközer, 2009	56	EU	X	X	
Lautrey y Mazens, 2004	83	EP	X		
Leccia et al., 2015	--	ES	X	X	X
Linder, 1992	10	EU		X	X
Linder, 1993	14	EU		X	
Linder y Erickson, 1989	10	EU		X	X
Mazens y Lautrey, 2003	89	EP	X		
Merino, 1998a	--	ES	X		
Merino, 1998b	--	ES	X		
Okur y Artun, 2016	80	ES		X	
Perales, 1997	140	ES, EU	X	X	X
Podolefsky y Finkelstein, 2007	151	EU			X
Saura y de Pro, 1999	43	ES		X	X
Sözen y Bolat, 2011	286	EP, ES		X	
Sözen y Bolat, 2016	234	ES	X	X	
Tongchai et al., 2009	902	ES		X	
Tongchai et al., 2011	902	ES, EU		X	
Treagust et al., 2001	23	ES	X	X	X
Vallejo et al., 2017	180	ES	X		
Viennot, 2004	600	ES, EU		X	
Volfson et al., 2018	159	EU		X	
West y Wallin, 2013	199	EP, ES	X		
Wittmann, 2002	137	EU			X
Wittmann et al., 1999	92	EU			X
Wittmann et al., 2003	137	EU		X	X
Yalçin et al., 2017	30	EU	X		

^a Las abreviaturas indican: EP: Educación Primaria; ES: Educación Secundaria; EU: Educación Universitaria.

Learning difficulties about the sound model: a review of the literature

Arantza Rico, Aritz Ruiz-González

Science, Technology and Mathematics Education Research (STEMER), Departamento de Didáctica de la Matemática y las Ciencias Experimentales, Facultad de Educación y Deporte, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Vitoria-Gasteiz (España).

arantza.rico@ehu.eus, aritz.ruiz@ehu.eus

Oier Azula

IES Artaza Romo BHI, Amaia Etorbidea, 28, 48940 Leioa (España).

irbiooierazula@artazaromo.com

Jenaro Guisasola

Science, Technology and Mathematics Education Research (STEMER), Departamento de Física Aplicada I, Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Donostia (España).

jenaro.guisasola@ehu.eus

Acoustic phenomena are closely related to our daily life and the understanding of the scientific model of sound (ScMS) is part of the science curriculum from Primary to University Education. Likewise, sound understood as a wave phenomenon can contribute to the understanding of general concepts of current Physics. However, the transition between understanding the ScMS from a phenomenological and interpretative point of view to understand it as a wave phenomenon does not appear to be trivial. In fact, students of all ages seem to present learning difficulties in describing and conceptualizing sound. There are no revisions on learning difficulties of the concept of sound and its properties that address a progressive educational analysis from Primary to University and which, in turn, include the fundamental characteristics of the ScMS. Thus, our review can provide novel and systematic information for teachers, researchers, and textbook authors. Our two research questions were: 1) Which results does research in science education show about the difficulties of students of Primary (PE), Secondary (SE) and early university courses (UE) when learning the ScMS?; and 2) from this analysis of learning difficulties, is it possible to identify a learning progression on the concept of sound?

This article describes the epistemological elements that define the structure of the ScMS for an educational level of introductory physics. The reviewed studies were grouped around the three key ideas of sound emerging from such analysis: 1) the nature of sound and its properties, 2) sound's propagation and 3) the wave model. Our review has shown that there is a robust bibliography which allows establishing the main difficulties and alternative conceptions about sound in different educational stages. In general, most studies investigated the difficulties to understand the propagation of sound in secondary and university education. Regarding the first key idea, that is, the nature of sound, our review has shown that students of all educational stages present high difficulties to understand that the sound originates by the vibration of an object and that it propagates through an elastic medium. Virtually all studies reviewed show that most PE and SE students, as well as significant percentages of EU students, present «materialistic» concepts of sound. In relation to the second key idea, the propagation of sound and the role played by the medium, the robustness and permanence throughout the time of the «materialistic» conceptions leads students to explain the physical phenomenon in the wrong way, even at university, when the wave model has been incorporated into their conceptions and they are equipped with a mathematical apparatus to solve wave equations. As for the third key idea, the understanding of the wave model to represent sound, research has been carried out fundamentally in the last courses of secondary and at university education. Research shows that it does not appear to be a clear connection between sound phenomena and the wave model, which demands a high mathematical abstraction. In teacher training, literature has shown that students are not able to establish relations between the intrinsic properties of sound and wave magnitudes. The analysis after the review shows us that even though the research shows that learning advances throughout the educational stages, the progression is scarce and most students still have difficulties in learning a scientific model about the nature of sound, its propagation and even more the wave model. The reviewed studies agree that to obtain an adequate learning progression, an ontological change in the explanatory model of sound must happen, from a «substantialist» conception of sound, through a vision of transmission of sound as a direct process until understanding the transmission as an emerging process when the wave model is properly incorporated.

