

El ciclo de modelización a través de la interacción oral en talleres experimentales sobre fuerza y movimiento

Camilo Vergara Sandoval 

Departamento de Física, Facultad de Ciencia, Universidad de Santiago de Chile. Núcleo Milenio para el Estudio del Desarrollo de las Habilidades Matemáticas Tempranas (MEMAT). Santiago, Chile. camilo.vergara.s@usach.cl

Víctor López-Simó 

Facultad de Ciencias de la Educación, Departamento de Didáctica de la Matemática y de las Ciencias Experimentales, Universitat Autònoma de Barcelona. Cataluña, España. victor.lopez@uab.cat

Digna Couso Lagarón 

Facultad de Ciencias de la Educación, Departamento de Didáctica de la Matemática y de las Ciencias Experimentales, Universitat Autònoma de Barcelona. Cataluña, España. digna.couso@uab.cat

[Recibido: 23 diciembre 2024, Revisado: 3 marzo 2025, Aprobado: 26 abril 2025]

Resumen: El ciclo de modelización es un instrumento que permite estructurar el diseño didáctico de secuencias de enseñanza y aprendizaje, y orientar la interacción dialógica en el aula que persigue guiar la progresión de ideas científicas del alumnado. Este ciclo propone 6 fases de instrucción docente asociadas a 6 desempeños esperados en el alumnado, siendo centrales las fases de uso y expresión del modelo inicial del alumnado, de evaluación de dichos modelos y de revisión en base a la emergencia de nuevos puntos de vista. Sin embargo, el orden de las prácticas de modelización en contextos reales suele diferir del ideal canónico. Esta investigación analizó las prácticas de modelización asociadas a la interacción estudiante de bachillerato-docente en 4 talleres experimentales de física newtoniana. Para ello, se grabaron y transcribieron 9,5 horas de diálogo y se analizaron más de 1.600 enunciados agrupados en 229 secuencias discursivas. Al analizar las prácticas de modelización asociadas a cada secuencia se identificaron cuatro grandes patrones de encadenamiento de dichas prácticas. El estudio de estos encadenamientos mejora nuestra comprensión de cómo se promueven discursivamente las prácticas de modelización en las clases de ciencias que contribuyan al progreso de ideas científicas del alumnado.

Palabras clave: Fuerzas; Interacción de aula; Modelización; Movimiento.

The modelling cycle through oral interaction in experimental workshops on force and motion

Abstract: The modeling cycle is an instrument that allows both structuring the design of teaching and learning sequences and the guidance of the dialogic interaction in the classroom focused on the progression of students' scientific ideas. This cycle proposes 6 instructional phases associated with 6 expected students' performance, the main ones being the use and expression of the student's initial model, the evaluation of these models and their revision based on the emergence of new points of view. However, the order of the modelling practices in real contexts often differs from the canonical ideal. This research analysed modelling practices associated with high school student-teacher interactions in 4 experimental Newtonian physics workshops. For this purpose, 9.5 hours of dialogue were recorded and transcribed, and more than 1,600 utterances grouped into 229 discursive sequences were analysed. By analysing the modelling practices associated with each sequence, we identified four main patterns of chaining of such practices that allow us to understand how modelling practices are discursively promoted in science classrooms, and the progress of students' scientific ideas through their participation in these practices.

Keywords: Classroom interaction; Forces; Modelling; Motion.

Para citar este artículo: Vergara, C., López-Simó, V. y Couso, D. (2025) El ciclo de modelización a través de la interacción oral en talleres experimentales sobre fuerza y movimiento. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 22(2), 2301. http://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2025.v22.i2.2301

Introducción

La modelización, el proceso de creación y refinamiento de modelos (Oh y Oh, 2011), es una actividad esencial tanto de la ciencia profesional como del aula de ciencias (Osborne, 2014; Garrido-Espeja y Couso, 2024), la cual permite desarrollar progresivamente modelos descriptivos e interpretativos de los fenómenos del mundo (Giere, 1988; Gilbert, 2004) que sirven para intervenir en éste (Izquierdo-Aymerich et al., 1999). Al modelizar se promueve que el alumnado pueda aprender tanto los productos como los procesos de la actividad científica (Duschl y Grandy, 2013; Minner et al., 2010).

El interés creciente por los modelos y la modelización (Campbell et al., 2015; Chiu y Lin, 2019; Louca y Zacharia, 2015; Upmeier zu Belzen et al., 2019; Marzàbal et al., 2024; Garrido-Espeja y Couso, 2024) ha llevado a explorar, identificar y analizar una variedad de estrategias didácticas que podrían encajar dentro de las denominadas como “orientadas a la modelización” (Oliva et al., 2018; Garrido-Espeja y Couso, 2024). Si bien esta variedad es fruto de la propia polisemia del término “modelización” (Oliva, 2019), incluye estrategias didácticas de naturaleza distinta. Algunas pasan por aspectos macro, como el diseño de secuencias didácticas especialmente orientadas a la modelización y la secuenciación de actividades (DBR collective, 2003), a menudo siguiendo patrones canónicos de modelización como el ciclo GEM (Generación, Evaluación y Modificación) (Rea-Ramírez et al., 2008) y más recientemente el IPM (Instruction Performance Modeling Cycle) (Garrido-Espeja y Couso, 2024). Pero algunas pasan por aspectos micro, como las interacciones cortas que se dan en medio de una clase, cuando el profesorado dialoga (Hennessy et al., 2016). Es sabido que la forma de interactuar oralmente de un docente a lo largo de una clase en forma de preguntas, comentarios, *feedbacks*, cuestionamientos o pistas parece jugar un papel clave en la forma como el alumnado expresa sus ideas y las discute en grupo (Hennessy et al., 2016; Kawalkar y Vijapurkar, 2013; Ruiz-Primo y Furtak, 2007; Williams y Clement, 2015). Sin embargo, no está tan claro como deben ser estas interacciones orales cuando se quiere promover la modelización en el aula de ciencias.

En este artículo nos adentramos en los procesos de modelización que se dan durante estas interacciones cortas entre alumnado y profesorado, para conocer hasta qué punto los procesos de modelización que promueven se corresponden con los patrones canónicos de modelización identificados en la literatura. Así, nos centraremos en analizar las interacciones que se dan en dos talleres REVIR (Pintó et al., 2016; Herrera et al., 2016), impartidos dos veces cada uno, los cuales incluyen un diseño didáctico explícitamente orientado a la modelización (López et al., 2018; Soto et al., 2017; Vergara et al., 2022). El objetivo es comprender cómo el estudiante expresa sus ideas, las evalúa y las revisa a través de la interacción con docentes.

Marco teórico

La modelización en la enseñanza de la ciencia

Para que el alumnado construya ideas y modelos útiles para intervenir en el mundo, es esencial que participe en prácticas como la de la modelización. La adopción de paradigmas

socio constructivistas en el aula de ciencias respaldan dicho enfoque. Estos paradigmas promueven la construcción y reconstrucción colectiva de conocimiento en lugar de la transmisión directa de ideas (Baek et al., 2011; Berland y Reiser, 2011; Lemke, 1990). Para hacer progresar las ideas del alumnado hacia los Modelos Científicos Escolares (MCE) (Izquierdo-Aymerich et al., 1999) las clases deben fomentar el cuestionamiento y progreso de las ideas intuitivas del alumnado. Esto se consigue con enfoques didácticos como la Indagación Centrada en la Modelización (MBI) (Windschitl et al., 2008), el cual organiza las clases mediante actividades que promueven la participación del alumnado en prácticas de modelización como: usar modelos para describir, explicar y predecir fenómenos; evaluar su adecuación; y revisar y modificar modelos con nueva evidencia (Clement, 1989, 1993; Gilbert y Justi, 2016). Considerando estos enfoques, en las clases de ciencias se sugiere incorporar herramientas que promuevan procesos iterativos de expresión, cuestionamiento y revisión de ideas (Nersessian, 2002). Estas herramientas se alinean con la idea de progresiones de aprendizaje (Duschl et al., 2011), donde las ideas alternativas del alumnado se sofistican pasando por ideas intermedias. Así, una clase de ciencia orientada por un enfoque MBI se desarrollará a través de procesos iterativos de modelización, promoviendo el tránsito de las ideas del alumnado hacia ideas más sofisticadas y cercanas a los MCE.

Diversos autores han propuesto ciclos para orientar la modelización, identificando fases instructivas que promueven la participación del alumnado en las prácticas de modelización (Baek et al., 2011; Clement y Rea-Ramirez, 2008; Garrido-Espeja y Couso, 2024; Hernández et al., 2015; Khan, 2007; Louca et al., 2011; Schwarz et al., 2009; Windschitl et al., 2008). Un ciclo clásico que guió el desarrollo de posteriores ciclos es el de Generación–Evaluación–Modificación (Rea-Ramirez et al., 2008), donde la fase inicial busca interesar al alumnado en un fenómeno, mientras que las fases posteriores median el cuestionamiento de ideas y su posterior revisión. Otro ciclo heredero del GEM es el ciclo IPM, que diferencia explícitamente la instrucción modelizadora de las prácticas de modelización esperadas en el alumnado. El IPM ha sido especialmente útil para estructurar las actividades que median el progreso de ideas del estudiantado (López et al., 2018; Soto et al., 2017; Vergara et al., 2022; Solé et al., 2019; Tena et al., 2020). En el círculo interior del IPM (desempeño de los estudiantes) se observan tres grandes prácticas interrelacionadas que se promueven de forma iterativa para cada idea o sub-idea científica: el uso y expresión del modelo (U), su evaluación (E) y su revisión (R).

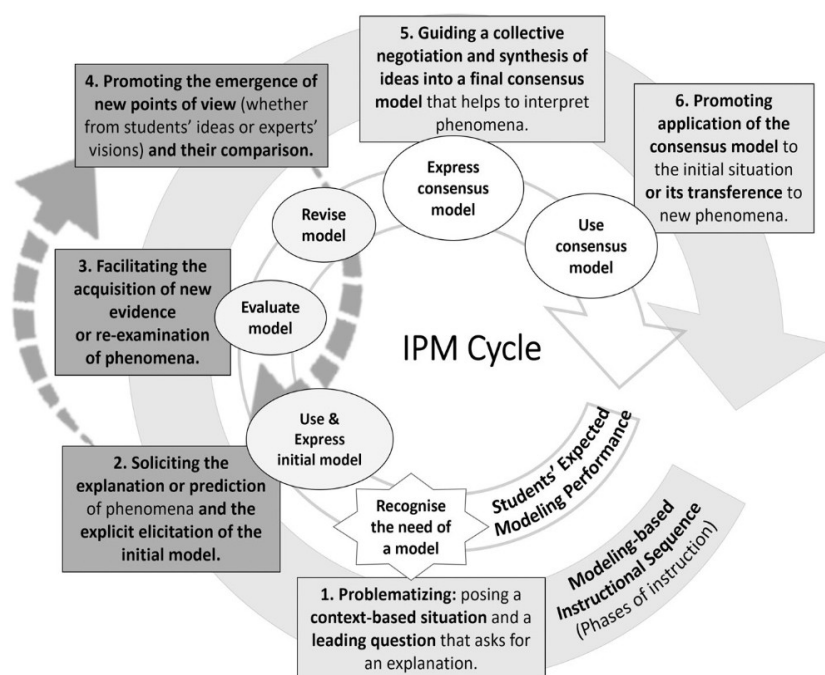


Figura 1. El ciclo IPM de modelización propuesto por Garrido-Espeja y Couso (2024).

En las prácticas de uso y expresión (U), el alumnado puede percibir un fenómeno, explorar un sistema y activar analogías propias en base a experiencias previas. Estas actividades son esenciales para que los estudiantes desarrollen ideas que les permitan describir, explicar y predecir fenómenos basándose en sus propias vivencias y conocimientos (Krell et al., 2019). Además, este tipo de actividades fomenta la expresión de ideas que podrán ser puestas a prueba, favoreciendo un entorno de investigación y cuestionamiento (Windschitl et al., 2008). Para ir más allá del mero uso de los modelos mentales preexistentes, se requiere la evaluación de la consistencia y representación de las ideas iniciales o prácticas de evaluación (E), donde el estudiante debe participar del debate y la recolección de evidencias que permitan poner a prueba las ideas expresadas y fortalecer el proceso de aprendizaje (Baek et al., 2011). Finalmente, en las prácticas de revisión (R) es crucial que los estudiantes articulen lógicamente las pruebas y argumentos que les han permitido comprender el fenómeno estudiado (Windschitl et al., 2008; Baek et al., 2011). Las estrategias de modelización en esta etapa pueden incluir la incorporación y modificación de ideas, lo que enriquece y refina el modelo final del alumnado (Khan, 2007; Núñez-Oveido et al., 2008). Esta práctica de revisión permite sintetizar y ajustar las ideas del alumnado, de manera que se llegue a consensos que se acerquen a los modelos científicos más sofisticados.

Sin embargo, tal como afirman Göhner y Krell (2022), estas prácticas no siempre se dan de forma secuencial. A veces los docentes usan estrategias de “sólo exploración” o bien de “exploración y desarrollo”, pero sin propiciar una revisión estructurada. Además, distintos grupos de estudiantes dentro de una misma aula pueden participar en diferentes prácticas de modelización incluso durante una misma fase de instrucción y de una misma actividad de aula (Garrido-Espeja, 2016). Por esto, la secuencia o encadenamiento de prácticas de modelización en las que participa el alumnado “in situ” no parece seguir siempre el patrón canónico que guía la instrucción (Garrido-Espeja y Couso, 2024).

La enseñanza y aprendizaje sobre fuerzas y movimiento

El modelo científico escolar de la mecánica newtoniana, comúnmente denominado en la enseñanza secundaria como “las fuerzas y el movimiento” es uno de los grandes modelos de la física escolar y de la ciencia escolar, y aparece como contenido clave en todas las propuestas y orientaciones curriculares contemporáneas (Harlen y Bell, 2010; NRC, 2012; OECD, 2019). Definido en algunos casos como una “familia de modelos” (Garrido-Espeja y Couso, 2024), a nivel escolar la física newtoniana se suele estudiar en dos ramas: la cinemática (centrada en la descripción de los cambios de posición de un cuerpo con respecto al tiempo) y la dinámica (centrada en explicar los cambios del estado del movimiento de los cuerpos como resultado de las fuerzas), cuya expresión más formal se hace a través de las Leyes de Newton. Entender el concepto de movimiento y de fuerza requiere un alto grado de abstracción, ya que implica operar con constructos anti intuitivos como la idea de sistema de referencia, la idea de fuerza como interacción (y no como propiedad de los cuerpos), o la relación entre la fuerza, la masa y el cambio de estado del movimiento.

De hecho, las ideas del modelo escolar de física newtoniana son tan anti intuitivas que en los modelos mentales que suele usar el alumnado de secundaria se incorporan muchas confusiones (Driver, 1989). Algunos de los modelos mentales más conocidos corresponden a las ideas intuitivas de fuerza aristotélica del tipo “cuando un cuerpo se mueve es porque le empuja una fuerza”, pero la variedad es mucho más amplia. Por ejemplo, tener idea meramente decorativa de los sistemas de referencia que se usan para describir el movimiento (Dimitriadis y Halkia, 2012); la confusión entre la representación de las trayectorias con las gráficas $x(t)$ y $v(t)$ que describen el movimiento (Eshach, 2014); o la confusión del significado de los signos algebraicos que se usan para definir el movimiento (Eriksson et al., 2019; Rebmann y Viennot, 1994). En dichos modelos mentales también existe a menudo una confusión entre los conceptos de velocidad, aceleración y fuerza, asociando la velocidad como algo proporcional a la fuerza y a la aceleración (Bayraktar, 2009; Demirci, 2005; Liu y Fang, 2016; Trowbridge y McDermott, 1980; Viennot, 1979).

Preguntas de investigación

1. ¿En qué prácticas de modelización participa el alumnado en el contexto de los talleres de ciencia centrados en la modelización?
2. ¿Cómo se suceden las prácticas de modelización al mediar la expresión, cuestionamiento y revisión de las ideas del alumnado?

Metodología

Para realizar esta investigación se requiere de un contexto de talleres de ciencia de enfoque centrado en la modelización sobre el que exista suficiente control didáctico (planificación de talleres, formación de docentes, etc.) para que las variaciones propias del contexto educativo, tales como el tema estudiado, el alumnado que asiste, las docentes que guían su desarrollo y el diseño didáctico, no interfieran demasiado en el discurso docente característico de este contexto. En el caso de esta investigación, este contexto controlado es el de los talleres REVIR.

Contexto de investigación

El proyecto REVIR (REalitat-VIRtualitat) del Col·lectiu per a la Recerca en Educació Científicotecnològica i Matemàtica (CRECIM) de la Universitat Autònoma de Barcelona

(UAB) ofrece talleres experimentales de física y química que buscan involucrar al alumnado de bachillerato en prácticas de modelización. El diseño didáctico de los talleres se ha realizado por investigadores e investigadoras en didáctica de las ciencias y se imparten en laboratorios de la universidad por especialistas del área formados por estos mismos investigadores. A cada taller asisten entre 25 y 35 estudiantes durante 4h y dentro de su horario de clase. Estos talleres conectan investigación y acción educativa, siendo escenarios donde se generan y aplican nuevos conocimientos didácticos, adaptando y mejorando continuamente su diseño. Las líneas de investigación incluyen el diseño de actividades, uso de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, secuencias didácticas y prácticas de modelización. Así, en estos talleres se han desarrollado investigaciones que evidencian cómo las clases con un enfoque centrado en la modelización fomentan el progreso de las ideas del alumnado.

Los talleres siguen una estructura basada en el ciclo de modelización (Garrido-Espeja y Couso, 2024). Cada fase de la instrucción de los talleres se relaciona con cierto objetivo didáctico cuya consecución supone la participación del alumnado en prácticas de modelización y el posible progreso de sus ideas hacia aquellas didácticamente más aceptadas. En primer lugar, los talleres comienzan con preguntas y retos para explorar ideas iniciales del alumnado (fase de familiarización: F). Luego, el taller continúa con actividades en las que se cuestionan y ponen a prueba las ideas del alumnado (fase de discusión: D). Finalmente, las discusiones acaban con una fase en la que se consensuan sobre las respuestas didácticas más aceptadas (fase de consenso: C).

En esta investigación se analizaron cuatro talleres que siguen la estructura previamente descrita. En los primeros dos talleres se estudian las fuerzas que se ejercen sobre una persona que realiza un salto de puéting (SP) (Herrera et al., 2016) y se cuestionan ideas sobre fuerza elástica y la relación entre fuerza resultante, aceleración y velocidad. En los segundos dos talleres se estudian las fuerzas que se ejercen sobre un coche que realiza un frenada en la carretera (EV) (Pintó et al., 2016), y se desafía la idea aristotélica de fuerza, inercia y la relación entre velocidad y fuerza de frenado. Todos los talleres fueron grabados en audio y video durante los años 2019 (SP19, EV19) y 2020 (SP20, EV20).

Participantes y recogida de datos

Los cuatro talleres contaron con la participación de cuatro grupos-clase de distintos institutos de Barcelona. Además del alumnado asistente, en los talleres participaron cinco docentes que guiaron su desarrollo (Tabla 1).

Tabla 1. Talleres grabados, sus códigos, fecha de grabación, y las y los docentes (anonimizadas) que guiaron los talleres. Elaboración propia.

Código	Fecha	Docentes
EV19	10/1/2019	Martina*, Alba, y Carles
SP19	13/2/2019	Martina*, Alba, y Carles
EV20	10/2/2020	Marisa*, Genís*, y Carles*
SP20	27/02/20	Marisa*, Genís*, y Carles*

Los talleres EV19 y SP19 se grabaron en audio y video. Se usó una grabadora de voz con micrófono de solapa para la docente. El video se registró con una cámara en una esquina del laboratorio. La disposición espacial se muestra en la Figura 2.

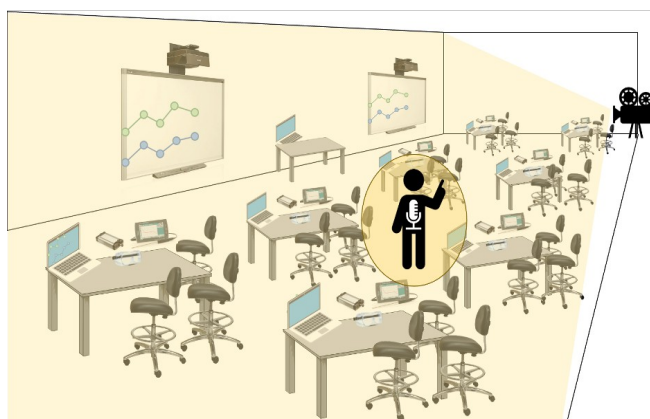


Figura 2. Disposición espacial de los participantes, y de la grabadora de video y de voz en los talleres EV19 y SP19. En amarillo se destaca el espacio que registraba la cámara y la grabadora. Elaboración propia.

Los talleres EV20 y SP20 fueron grabados en video. Se colocaron cámaras en las mesas donde se sentaban grupos de estudiantes, algunos seleccionados por el profesorado del instituto acompañante y otros al azar. Durante las puestas en común, se enfocaba a la docente guía y al alumnado. La disposición espacial se muestra en la Figura 3.

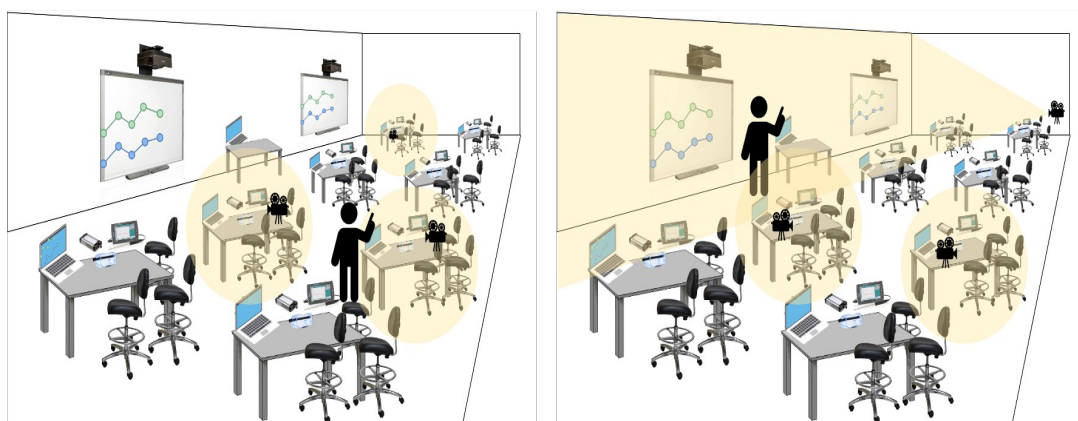


Figura 3. (Izquierda) Disposición espacial de los participantes y de las grabadoras de video que registraban a los grupos de estudiantes. (Derecha) Disposición espacial de los participantes y de las grabadoras de video que registra a la docente y los grupos que interactuaban con ella durante una discusión en gran grupo. En amarillo se destaca el espacio que abarcaban las grabadoras. Elaboración propia.

Análisis y representación de los datos

De las 9,5 horas grabadas se seleccionaron momentos que fueron importantes para el desarrollo de las ideas del alumnado y su participación en prácticas de modelización. Se transcribieron los diálogos de alumnado y docentes obteniendo así más de 1.600 enunciados del discurso de la docente, los cuales fueron transcritos en Excel. Se analizaron las ideas del modelo de fuerza y movimiento discutidas por alumnado y docentes en dichos diálogos (Figura 4), lo que permitió identificar la idea predominante en las interacciones.

Diálogo entre alumnado y profesorado
D1: ¿Qué le pasa a la cuerda y al saltador a medida que va avanzando la caída? ¿qué va pasando? ¿o por qué el saltador no para de golpe?
D1: ¿Pongamos un ejemplo con este pote? <i>[Enseñando al alumnado el pote y la canica que representan al saltador]</i> <i>[Tomando la cuerda por un extremo, dejando colgar el pote y la canica que representan al saltador, por el otro]</i> Esto representa que es nuestro saltador, ¿sí?
E: ...
D1: Veamos, ¿qué etapa han identificado muchos de ustedes?
E: Cuando está aquí y comienza a avanzar <i>[Subiendo el pote y la canica a la altura de la posición del extremo superior de la cuerda]</i> .
D1: Vale, y mientras tanto, ¿qué está pasando? <i>[Mientras va estirando la cuerda con el pote y la canica hacia abajo]</i> .
E: Va aumentando la velocidad.
D1: Vale, esto, sí, ya lo veremos después. Algunos de ustedes me han dicho otra cosa, ¿no? Le han puesto a otro nombre a esto... <i>[Estirando la cuerda hacia abajo reiteradas veces]</i> .
E: Caída libre...
D1: Caída libre, ¿sí? Vale.
E: Este tramo <i>[Refiriéndose a una etapa posterior de la trayectoria de descenso del saltador]</i> .
D1: Claro, pero de tramo a tramo, o sea, encontrarán un punto, ¿no?
E: Bueno.
D1: ¿Cuál es este punto de aquí? <i>[Refiriéndose al momento en que el peso del saltador se iguala con la fuerza elástica de la cuerda]</i> .
E: El de aceleración máxima.

Figura 4. Diálogo entre alumnado (E) y una docente (D1) durante el taller SP19 en el que se identificaron ideas relacionadas a fuerza y movimiento

Para analizar el progreso de las ideas del alumnado y sus prácticas de modelización se siguieron las recomendaciones metodológicas de Hennessy et al. (2020). Así, como unidad de análisis se utilizó aquella definida por conjuntos de enunciados de alumnado y docente en los que se discute una idea particular del modelo de fuerzas y movimiento. Cada uno de estos conjuntos de enunciados se denominan secuencias discursivas, y sus límites se definen según los siguientes criterios:

- comienza cuando la docente inicia una interacción sobre una idea del modelo de fuerza y movimiento, y termina cuando el alumnado alcanza una versión más sofisticada, pudiendo continuar la interacción con otra idea.
- se extiende mientras el alumnado no use una idea didácticamente menos aceptada. Si el alumnado enuncia una idea menos aceptada, se inicia una nueva secuencia discursiva.
- puede finalizar antes de los límites definidos previamente si la docente deja una interrogante y pasa a otro grupo, o si inicia una interacción en gran grupo.

En las transcripciones en Excel, los conjuntos de filas consecutivas (una o más) definen las secuencias discursivas. Cada secuencia discursiva se categorizó con alguna de las tres prácticas de modelización: usar/expresar, evaluar o revisar modelos. La agrupaciones de secuencias discursivas consecutivas pueden resultar en momentos en los que se fomenta el uso y/o expresión, desarrollo, cuestionamiento y/o revisión de una idea particular del alumnado, definiendo así encadenamientos de secuencias discursivas. Uno o más

encadenamientos de secuencias discursivas definen un episodio, cuyos límites de inicio y fin son dados por los mismos criterios que definen una secuencia discursiva.

Posteriormente, se usó una distribución temporal de las prácticas de modelización (Figura 6) inspirada en la investigación de Colley y Windschitl (2021) (Figura 5), en la que distintas actividades en un aula de ciencia son asociadas a distintos códigos de colores que se distribuyen temporalmente de izquierda a derecha.

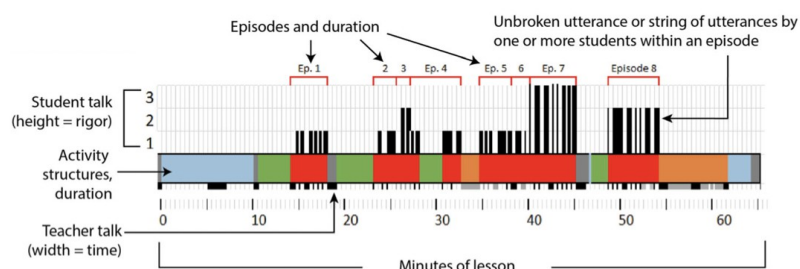


Figura 5. Representación de código de barras del discurso de aula (Colley y Windschitl, 2021).

Así, se propuso la representación de distribución de prácticas de modelización en los talleres REVIR (Figura 6). En esta representación se muestran los cuatro talleres REVIR (EV19, SP19, EV20 y SP20), las fases de la instrucción (F, D y C), los episodios que los conforman y las prácticas de modelización que éstos se desarrollan. Se utilizaron códigos de colores para cada práctica de modelización (amarillo para usar/expresar ideas, rojo para evaluar ideas, y verde para revisar ideas).

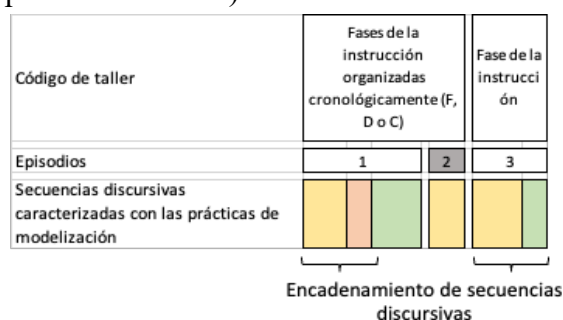


Figura 6. Representación de distribución de prácticas de modelización en los talleres REVIR. En la fila de episodios, en blanco las interacciones en pequeños grupos, y en gris, las interacciones en gran grupo. Los distintos anchos de las secuencias discursivas representan la duración de las respectivas secuencias.

Resultados y discusión

Esta manera de representar cómo se agrupan las prácticas de modelización (Figura 6) permitió tener una visión general de cómo se distribuyen éstas en los talleres REVIR (Figura 7).

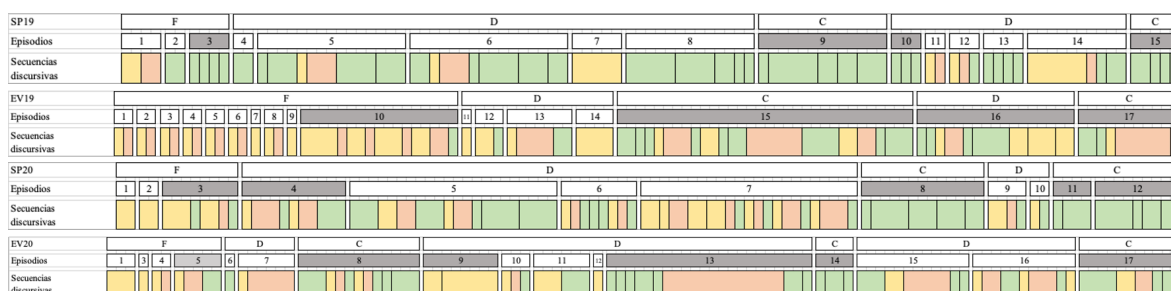


Figura 7. Distribución de prácticas de modelización en los talleres REVIR (en orden descendente: SP19, EV19, SP20 y EV20).

Esto permitió identificar regularidades en cómo se sucedían las prácticas de modelización, las cuales podían ser distintas a las sugeridas por el ciclo GEM (Rea-Ramirez et al., 2008). Esto concuerda con lo señalado por Garrido-Espeja (2016), cuyo estudio muestra que el alumnado participa en diversas prácticas de modelización incluso al participar de actividades diseñadas para una fase específica del ciclo de modelización. Así, aunque pudiera presuponerse que en una clase de ciencias centrada en la modelización siga el ciclo GEM (Rea-Ramirez et al., 2008), las prácticas de modelización en las que se involucran docentes y alumnos resultan no ocurrir en dicho orden. Así, se observan encadenamientos de prácticas distintos al ciclo GEM, relevantes para el cuestionamiento y progreso de las ideas del alumnado. A continuación, se presentan dichos encadenamientos.

Encadenamiento de prácticas para la expresión (U-U) de ideas

Este encadenamiento de prácticas de modelización incluye solo prácticas de usar/expresar ideas. Promueve que el alumnado use sus ideas sobre el modelo estudiado basándose en su experiencia cotidiana. Este encadenamiento ocurre principalmente durante las fases de familiarización y discusión, y no se encadena inmediatamente con prácticas de evaluar o revisar. Sin embargo, suele ser parte de otros encadenamientos, excepto cuando el alumnado enuncia ideas didácticamente aceptadas desde un principio. Este encadenamiento se identifica en los siguientes episodios de los talleres estudiados (Figura 8).

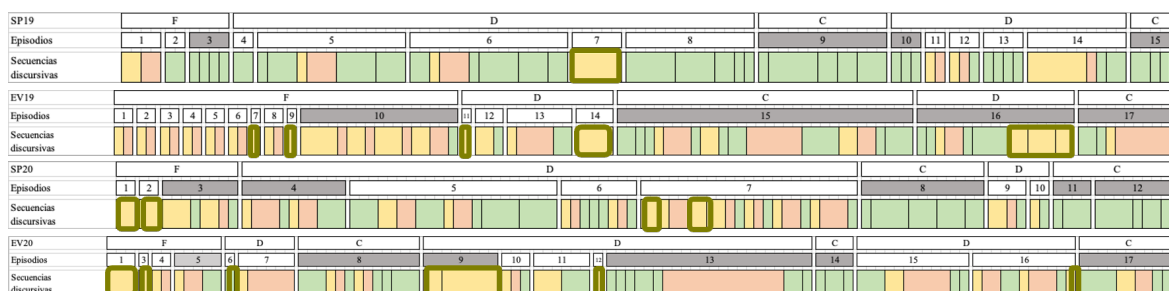


Figura 8. Episodios en talleres REVIR con encadenamientos U-U.

Como ejemplo se presenta parte de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento de tres secuencias discursivas que ocurren durante el episodio 16 del taller EV19 (Figura 9).

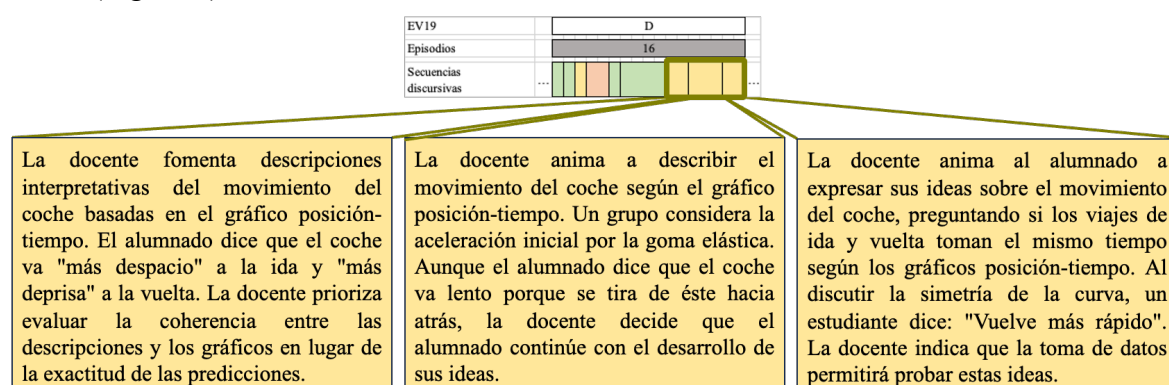


Figura 9. Ejemplo de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento U-U.

Este encadenamiento favorece que el alumnado explore sus ideas mediante la reflexión y discusión, permitiendo al profesorado acercarse a sus ideas intuitivas, pero sin emitir juicios. Tal como se muestra en el ejemplo anterior, el alumnado piensa que el coche irá "más despacio" en la ida, y "más deprisa" en la vuelta. Esta idea se puede asociar a la idea

aristotélica de fuerza (Driver, 1989) y la proporcionalidad entre fuerza y velocidad (Demirci, 2005): el alumnado pareciera pensar que hay una relación proporcional entre la fuerza resultante ejercida sobre el coche en su movimiento de ida y su rapidez. En la ida, al ser la tensión y la fuerza de roce opuestas al sentido de movimiento del coche, el módulo de la fuerza resultante en la ida es mayor que en la vuelta. Mientras que la suma vectorial de fuerzas en la vuelta, al tener distintos sentidos la tensión y la fuerza de roce, tiene un módulo menor. Además, en lugar de considerar que la suma vectorial de fuerzas será proporcional a la (des)aceleración, consideran que es proporcional a la rapidez. Esto les hace pensar que, al ser mayor el módulo de la fuerza resultante en la ida, su rapidez será menor, haciendo que su movimiento de ida sea más lento. Cuando en realidad, al ser el módulo de la fuerza resultante mayor en la ida, y además, contrario al sentido de movimiento, la rapidez del coche se aproximará a cero más rápidamente que cuando el módulo de la fuerza resultante es menor (en la vuelta). La evaluación y revisión de esta y otras ideas se realiza en momentos posteriores del taller.

Este encadenamiento concuerda con las categorías propuestas por Krell et al. (2019) y utilizadas por Göhner y Krell (2022), las cuales se relacionan con actividades de modelización asociada a su categoría “Sólo exploración”, tales como “percepción de un fenómeno”, “exploración de un sistema” y “activación de analogías y experiencias”. Todas estas actividades son concordantes con los objetivos de la práctica de modelización usar/expresar ideas, como también de las fases de la instrucción del taller en la que esta secuencia de prácticas de modelización es más frecuente. Tal como señala Krell et al. (2019), este tipo de actividades respaldan el desarrollo de ideas para describir, explicar y predecir un fenómeno, las cuales serán probadas en momentos posteriores (Windschitl et al., 2008). Además, estas secuencias discursivas pueden ayudar al profesorado a organizar posteriores discusiones en gran grupo para mediar el progreso de las ideas del alumnado.

Encadenamiento de prácticas para la evaluación de ideas (U-E)

Este encadenamiento incluye las prácticas de usar/expresar y evaluar ideas. La docente promueve que el alumnado exprese sus ideas y las cuestione, pero no fomenta la revisión inmediata de éstas. Este encadenamiento suele ocurrir en las fases de familiarización y discusión, permitiendo que el alumnado explore y evalúe sus ideas, usando su experiencia cotidiana e intuición. A pesar de su importancia, este encadenamiento no es frecuente en los talleres REVIR, apareciendo principalmente en discusiones donde el profesorado cuestiona los montajes experimentales. Este encadenamiento se identifica en los siguientes episodios de los talleres (Figura 10).

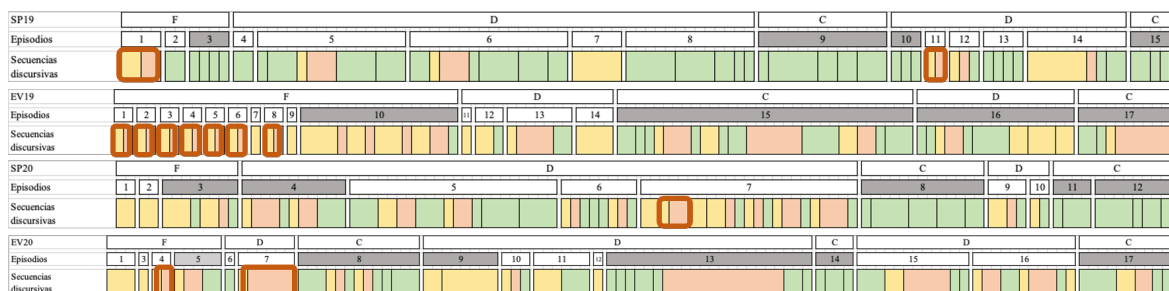


Figura 10. Episodios en talleres REVIR con encadenamientos ExE.

Como ejemplo se presenta parte de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento de dos secuencias discursivas que ocurren durante el episodio 7 del taller SP20 (Figura 11).

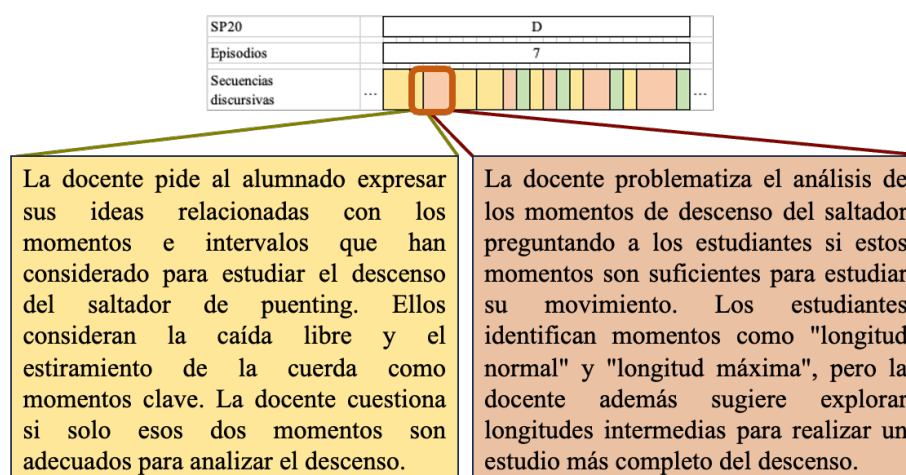


Figura 11. Ejemplo de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento U-E.

Con este encadenamiento la docente puede conocer las ideas intuitivas del alumnado y promover la problematización de las mismas para fomentar su desarrollo. Tal como en el ejemplo anterior, el alumnado piensa en momentos clave del descenso del saltador que son observables a simple vista (cuando acaba de saltar, cuando la cuerda apenas se empieza a estirar, cuando se alcanza la posición más baja), pero no suele tener en cuenta aquellos que no se notan tanto, pero en los que hay singularidades en las magnitudes involucradas. Por ejemplo, no suelen identificar el momento durante la caída en que el módulo de la fuerza elástica de la cuerda y el peso del saltador se igualan. Dicho momento es relevante porque a partir del mismo la aceleración cambia de sentido, provocando un cambio de movimiento del saltador (de acelerarse a frenarse) que no suele ser perceptible por el alumnado a simple vista. Aquí el papel de la docente es promover un análisis detallado y profundo que ayude a cuestionar las ideas iniciales. Cabe destacar que este encadenamiento no incluye una revisión posterior, centrándose en que alumnado explore con más detalle sus ideas antes de recibir aportes más concretos del profesorado.

Este encadenamiento coincide con las categorías de Göhner y Krell (2022), relacionadas con el desarrollo y evaluación de modelos. Estos autores mencionan que el proceso de modelización que transcurre en su categoría denominada “exploración y desarrollo con un foco sobre desarrollo”, puede dividirse en actividades de modelización, tales como: “desarrollo de modelos orientado a la activación de analogías y experiencias”, y “evaluación de la consistencia y la representación”. En concordancia con lo que menciona Windschitl et al. (2008), este encadenamiento fomenta que el alumnado piense en evaluar sus propias ideas y buscar evidencias para apoyar sus argumentos, promoviendo así su participación en prácticas científicas auténticas (Hernández et al., 2015). Además, motiva a recurrir al debate y a la evidencia empírica para poner a prueba las ideas (Baek et al., 2011). Así también, al igual que en el encadenamiento U-U, a través de este encadenamiento la docente puede planificar cómo articular las distintas ideas y evidencias surgidas del trabajo en pequeños grupos.

Encadenamiento de prácticas para la evaluación y revisión de ideas (U-E-R)

Este encadenamiento es conformado por las prácticas de usar/expresar, evaluar y revisar ideas. Puede manifestarse en secuencias discursivas donde el alumnado participa en encadenamientos U-E, para luego acabar con la revisión ideas. También se puede iniciar con la expresión de ideas iniciales, dando lugar a que surjan nuevas ideas alternativas cuya revisión permite abordar la idea inicial. Cuando se desarrolla este encadenamiento, las

discusiones se centran en una idea específica del modelo, la cual es evaluada y revisada posteriormente. En contraste con modos de enseñanza transmisivos, este encadenamiento es común en los talleres REVIR (Hernández et al., 2015). De hecho, estos encadenamientos suelen preceder los consensos sobre las ideas del alumnado. Es decir, el alumnado se involucra en actividades que les permiten expresar y cuestionar sus ideas, lo que motiva la revisión basada en evidencia.

Este tipo de encadenamiento se destaca en la fase de discusión, donde la docente fomenta la reflexión y el desarrollo de ideas. Este encadenamiento se identifica en los siguientes episodios de los talleres (Figura 12).

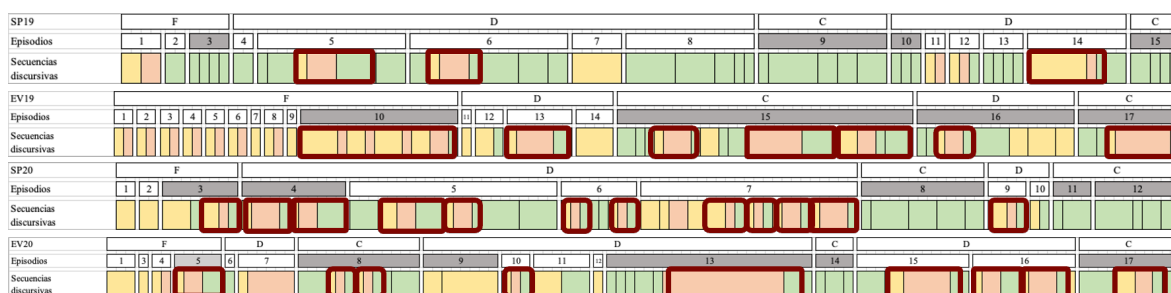


Figura 12. Episodios en talleres REVIR con encadenamientos U-E-R.

Como ejemplo se presenta parte de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento de tres secuencias discursivas que ocurren durante el episodio 7 del taller SP20 (Figura 13).

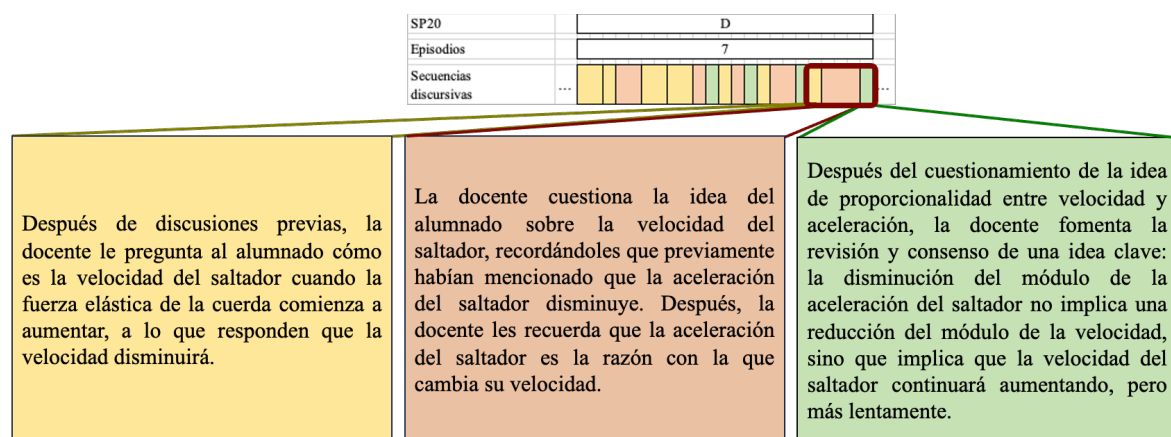


Figura 13. Ejemplo de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento U-E-R.

Estos encadenamiento U-E-R, que siguen la forma canónica de los ciclos GEM (Rea-Ramirez et al., 2008), desempeñan un papel crucial al impulsar el progreso de las ideas del alumnado hacia otras más sofisticadas. En ellos se destaca el rol de la evidencia empírica para el cuestionamiento y la revisión local de ideas (Baek et al., 2011). De hecho, las conversaciones que favorecen el enfoque MBI, similar al encadenamiento U-E-R, mejoran la competencia de los estudiantes en la indagación científica (Windschitl et al., 2008). En el ejemplo anterior se puede apreciar cómo la docente cuestiona la idea de proporcionalidad entre fuerza y velocidad (Demirci, 2005), promoviendo que se reconstruya la idea de aceleración que ya había sido consensuada previamente con el alumnado: la aceleración es la razón con la que cambia la velocidad en un determinado tiempo. Dicha idea permitió que el alumnado cuestionara la proporcionalidad directa entre velocidad y fuerza, y pasara a pensar que, si la fuerza resultante disminuye, lo que

disminuye es la aceleración resultante y por tanto no es que la velocidad disminuya, sino que lo que disminuye es la razón con la que venía aumentando la velocidad del saltador.

La estructura canónica del encadenamiento U-E-R y la emergencia de diferentes ciclos U-E-R unos detrás de otros, nos indican que, a menudo, el cuestionamiento o revisión de ideas y sub-ideas del modelo se realiza de forma secuencial, unas detrás de otras. Sin embargo, el hecho de que en el aula de ciencias queramos construir ideas poco intuitivas con el alumnado hace que a menudo sea necesario, dentro de un patrón U-E-R que cuestiona una cierta idea, recuperar o volver a cuestionar una sub-idea cuestionada y revisada anteriormente (en un U-E-R previo). Esto puede apreciarse en el ejemplo de la Figura 13, donde vemos que dentro de un encadenamiento U-E-R en el que por primera vez se cuestiona una idea particular compleja (la idea intuitiva de proporcionalidad directa entre fuerza y velocidad), surge la necesidad didáctica de volver a cuestionar y revisar una sub-idea trabajada previamente (en este caso, la idea intuitiva de proporcionalidad directa entre velocidad y aceleración). Es decir, el cuestionamiento y revisión de nuevas ideas científicas mediante la modelización U-E-R puede ser el escenario para afianzar ideas científicas anteriores a través de nuevos cuestionamientos y revisiones. Sin embargo, este aprovechamiento de cada nueva oportunidad de construcción de ideas en un U-E-R para reconstruir ideas ya trabajadas en encadenamientos U-E-R previos no es una tarea sencilla para el profesorado. Tal y como sugiere la investigación de Ruiz-Primo y Furtak (2007), esto requiere que el profesorado oriente las discusiones hacia la comparación y contraste de las ideas del alumnado y sobre todo que use estas situaciones (*Use students' response*) como un trampolín para volver a cuestionar y revisar sus ideas.

Encadenamiento de prácticas para el consenso de ideas (R-R)

Este encadenamiento se centra en la práctica de revisar las ideas para llegar a ideas finales consensuadas, partiendo habitualmente de su uso/expresión. Se observa cuando el profesorado fomenta que el alumnado exprese sus ideas en momentos en los que estas ideas ya pueden ser bastante sofisticadas. Por ello, este encadenamiento es más común durante las fases de discusión y sobretodo consenso. Durante la fase de discusión, suele suceder cuando las ideas del alumnado progresan de manera bastante autónoma, o después de interactuar con docentes que han mediado su progreso a partir de expresiones, cuestionamientos y revisiones previos. Durante el consenso, ocurre principalmente durante las puestas en común, donde es probable que el alumnado haya interactuado con docentes que han cuestionado sus ideas logrando sofisticarlas a lo largo de éste. Los encadenamientos que comienzan con la práctica de usar/expresar ideas, y que no cuentan con prácticas de evaluación, a menudo resultan de diálogos entre estudiantes y profesores, donde el profesorado, de manera oportuna, conduce el progreso de las ideas del alumnado hacia aquellas objeto de enseñanza. Es decir, a diferencia de los encadenamientos U-U y U-E, que fomentan la divergencia de ideas, durante los encadenamientos R-R se promueve la convergencia y el consenso. Este encadenamiento se identifica en los siguientes episodios de los talleres (Figura 14).

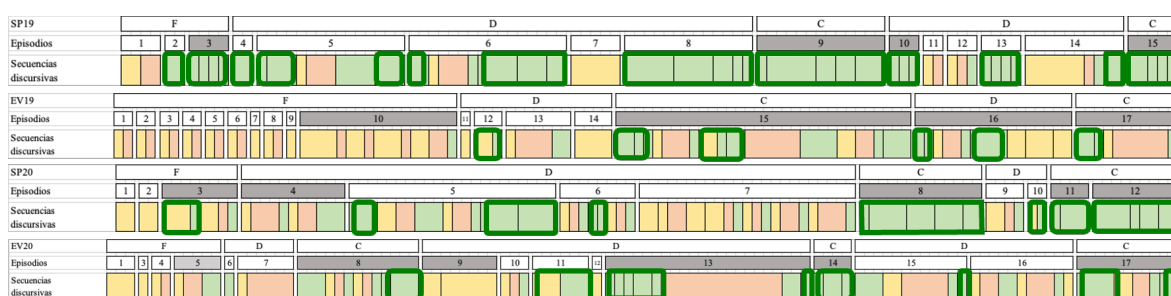


Figura 14. Momentos en talleres REVIR con encadenamientos R-R

Como ejemplo se presenta parte de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento de seis secuencias discursivas que ocurren durante el episodio 8 del taller SP20 (Figura 15).

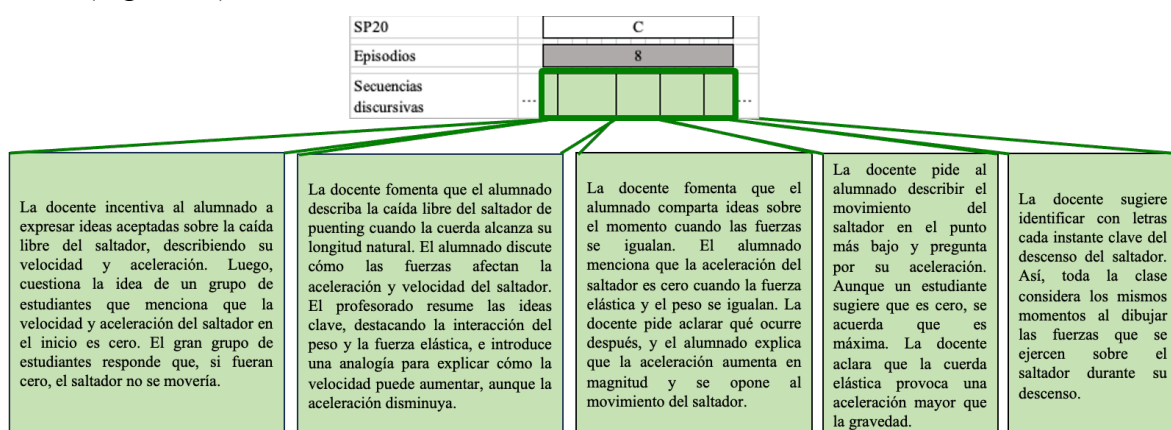


Figura 15. Ejemplo de lo que hace alumnado y docente durante el encadenamiento R-R.

Tal como se ve en el ejemplo anterior, cuando el alumnado participa del encadenamiento R-R, es como si la docente fomentara el uso y/o expresión de ideas del alumnado. Sin embargo, el alumnado suele responder desde ideas sofisticadas, ya sea porque revisó previamente el modelo, o lo está revisando en el momento en que la docente realiza las preguntas. En este caso, de manera similar al encadenamiento U-E-R, la docente, entre otras ideas, cuestiona la idea de proporcionalidad entre fuerza y velocidad (Demirci, 2005), e incluso utiliza una analogía para consensuar que la fuerza resultante que se ejerce sobre el saltador es proporcional a su aceleración resultante.

Este encadenamiento de prácticas de modelización ocurre generalmente durante las puestas en común para alcanzar y hacer explícito el consenso de ideas. Es importante que en las últimas fases de una instrucción centrada en la modelización se articulen lógicamente las ideas y pruebas empíricas que permiten abordar el problema estudiado (Windschitl et al., 2008; Baek et al., 2011). Además, estos encadenamientos pueden incluir la incorporación o reemplazo de ideas para refinar el modelo final del alumnado (Khan, 2007; Núñez-Oveido et al., 2008). Así, este encadenamiento resume, reemplaza, incorpora y sustrae ideas relevantes, pero siempre reconociendo las aportaciones del alumnado. Además, inspirados en lo que sugiere Williams y Clement (2015), este tipo de encadenamiento ayudaría tanto a profesorado como a alumnado a lidiar con ideas poco sofisticadas que pudieron haber surgido en algunos grupos de estudiantes y no en otros. Así, a través de este encadenamiento, la docente promueve que el alumnado revise la mayor cantidad de ideas que pretendían ser desarrolladas durante el taller.

Conclusiones

Esta investigación tuvo el objetivo de analizar las prácticas de modelización en las que participa el alumnado de bachillerato y el progreso de sus ideas respecto al modelo de fuerzas y movimiento en el contexto de talleres experimentales centrados en la modelización. La consecución de este objetivo se logró dando respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿En qué prácticas de modelización participa el alumnado en el contexto de los talleres de ciencia centrados en la modelización?, y ¿cómo se suceden las prácticas de modelización al mediar la expresión, cuestionamiento y revisión de las ideas del alumnado?

Es sabido que la participación del alumnado en auténticas prácticas de modelización se puede fomentar a través de clases de ciencia diseñadas y orientadas por el ciclo canónico de modelización (Baek et al., 2011; Garrido-Espeja, 2016; Gilbert y Justi, 2016; Rea-Ramirez et al., 2008; Windschitl et al., 2008). Sin embargo, la participación del alumnado en prácticas de modelización no siempre ocurre en dicho orden (Garrido-Espeja, 2016). Los resultados de esta investigación profundizan en la idea de que la estructura de los ciclos GEM (Rea-Ramirez et al., 2008) es limitada para describir cómo se desarrollan las prácticas de modelización en el aula. En el aula real dicha secuencialidad se ve afectada por la co-existencia de distintas ideas intuitivas del alumnado que requieren ser expresadas, cuestionadas y revisadas, por la voluntad docente de fomentar que alumnado explore y desarrolle, cuestione y revise sus propias ideas en pequeño grupo, por la necesidad de ir retomando la discusión de ideas previas cuyo progreso permite el desarrollo de ideas posteriores, por la alternancia del trabajo entre grupos de estudiantes y el grupo clase, etc.

A pesar de esta rotura en la secuencialidad canónica de la modelización en el aula, se han visto regularidades que han permitido identificar agrupaciones de prácticas de modelización que suelen desarrollarse en torno a una idea particular del alumnado. Dichas agrupaciones se han denominado encadenamientos de prácticas de modelización, donde tres de éstos son distintos a la secuencia canónica. El encadenamiento U-U, a través del cual se promueve que el alumnado exprese y desarrolle sus ideas; el encadenamiento U-E, a través del cual se promueve que el alumnado cuestione sus ideas; el encadenamiento U-E-R, correspondiente a la secuencia canónica, donde se promueve que el alumnado exprese, cuestione y revise sus ideas; y el encadenamiento R-R, a través del cual se promueve que el alumnado, en ocasiones exprese, pero sobre todo, revise y consensue sus ideas. La presencia de dichos encadenamientos se relaciona con fases de instrucción particulares: el encadenamiento U-U y U-E suelen estar más presentes en las fases de familiarización, el encadenamiento U-E-R suele estar más presente en las fases de discusión y consenso, y el encadenamiento R-R suele estar más presente en las fases de consenso. Por esto, cada encadenamiento tiende a asociarse a un objetivo didáctico particular propio de cada una de las fases de la instrucción de una clase centrada en la modelización. Este resultado profundiza lo encontrado Garrido-Espeja y Couso (2024): que las prácticas de modelización se suceden rápidamente, pero que su distribución ocurre en función de la fase de instrucción: en la fase de familiarización prevalece la práctica de usar/expresar y evaluar ideas, en la fase de consenso prevalece la práctica de revisar ideas, y en la fase de discusión prevalecen los encadenamientos que incluyen las tres prácticas.

La interacción es protagonista en un aula centrada en la modelización, tanto entre estudiantes, quienes expresan sus ideas previas en relación al fenómeno estudiado, cuestionando sus distintas maneras de explicar dichos fenómenos, como sobre todo con el profesorado. Como puede verse en todos los ejemplos, el rol del docente que guía el

desarrollo de los talleres es fundamental, ya que el profesorado es quien orquesta sus acciones para hacer participar al alumnado en prácticas de modelización y encadenamientos específicos de acuerdo con el momento de la clase y las ideas del alumnado. Aunque otros autores ya han señalado que la práctica de evaluación de ideas se da principalmente en momentos de interacción con el profesorado al cuestionar sus ideas (Louca y Zacharia, 2015), nuestros ejemplos apuntan a la importancia del docente como activador de la modelización para todas las prácticas, y de manera altamente sofisticada y específica: a través del uso de encadenamientos de prácticas de modelización diversos para los diferentes momentos de instrucción (familiarización, discusión, consenso) y de manera coherente con el nivel y evolución de las ideas y sub-ideas.

Es necesario considerar que esta investigación se ha desarrollado en un entorno de alta calidad didáctica y ampliamente controlado como lo son los talleres REVIR. Alta calidad porque se implementan secuencias didácticas fundamentadas en investigación y mejoradas siguiendo metodologías de evaluación de validez y fiabilidad (Tena y Couso, 2023), con montajes experimentales robustos y bien probados, y por parte de docentes con extensa formación que han mejorado su praxis al ser objeto de observaciones externas en diversas investigaciones. Altamente controlado porque la implementación iterativa (realización del mismo taller en muchas ocasiones con diferente alumnado) permite que el profesorado anticipe dificultades comunes en diferente alumnado y experimente qué acciones docentes son clave para mediar la expresión, cuestionamiento y revisión de estas ideas intuitivas. Sin embargo, también se trata de un contexto especialmente intenso debido a la alta densidad conceptual (se tratan temáticas complejas de nivel de bachillerato) así como a la limitación temporal (los talleres son de 4 horas cronológicas que deben aprovecharse). Esto hace que sean talleres que imponen un ritmo alto tanto al alumnado como al profesorado participante, en los que la focalización en el fenómeno estudiado y la interacción dialógica con las diferentes docentes, tanto en pequeño como gran grupo, es constante. En este sentido, no se trata seguramente de una situación reproducible literalmente en el aula ordinaria, en la que existen muchos otros condicionantes y limitaciones, pero también un ritmo más pausado y la posibilidad de más abertura y conexión con otras ideas o fenómenos.

A pesar de ello, creemos en la enorme utilidad de estudiar situaciones educativas altamente controladas, pero a su vez reales, realizadas con alumnado ordinario, para poder analizar, sin el ruido de otras variables educativas teóricamente controlables, la potencialidad de estrategias didácticas sofisticadas como el uso de encadenamientos de modelización. Así, de la misma manera en que el Ciclo GEM o el Ciclo de Modelización IPM son herramientas didácticas para orientar a nivel macro el diseño de materiales educativos y las clases de ciencias centradas en esta práctica científica, los encadenamientos de prácticas de modelización identificados en este estudio constituyen estructuras de nivel más micro que reflejan el esfuerzo de articular en el aula dichas prácticas, de forma coordinada con la emergencia y progreso de las diferentes ideas y sub-ideas, para alcanzar los objetivos didácticos de estas herramientas. Además, la descripción rica de las situaciones de aula en las que se identifican estos encadenamientos de prácticas de modelización permite mostrar situaciones educativas auténticas en las que el alumnado participa de dichas prácticas gracias a la acción del profesorado. Consideramos que estos ejemplos pueden constituir un material de apoyo a la formación del profesorado de ciencias, al sugerir ejemplos reales de “cómo es” o “qué cosas pasan” en un aula centrada en promover la modelización (Garrido-Espeja y Couso, 2024).

El alto control de la situación educativa en los talleres REVIR no significa, sin embargo, que en todos los talleres ocurra exactamente lo mismo, ni que los diálogos que las docentes promueven estén altamente encorsetados o ritualizados. Como se muestra en los resultados, los cuatro talleres presentan patrones de modelización muy diferentes (Figura 7). Mientras que con unos grupos se avanza rápido porque poseen amplios conocimientos previos del tema y se llega pronto a consensos iniciales a partir de los que trabajar, con otros se requiere un largo proceso de familiarización con el dispositivo experimental y mucho tiempo de expresión de ideas iniciales para recoger todas las alternativas que surgen. Y aunque las dificultades de los estudiantes en algunos aspectos son comunes, también emergen otras ideas intuitivas, distintas a las más frecuentes en el contexto de los talleres. Es por ello que consideramos crucial la formación continua del profesorado participante y sobre todo su posicionamiento didáctico: independiente de las ideas que surjan en los talleres REVIR, el profesorado asume un rol de co-constructor de las mismas potenciando su cuestionamiento y revisión. Además, el taller no suele ser el final del tratamiento de un tema sino el punto de partida del mismo: los docentes acompañantes del alumnado toman el relevo en el aula ordinaria y a menudo nos cuentan cómo han conectado los aprendizajes y conversaciones en el taller REVIR con el estudio de otros fenómenos o cómo han profundizado en cuestiones más abiertas que en el taller se quedaron sin resolver.

Con el mismo espíritu de seguir avanzando, a partir de este estudio surgen importantes interrogantes sobre cómo promover la modelización auténtica en el aula de ciencias. Si bien hemos identificado que las docentes han de promover la expresión, el desarrollo, el cuestionamiento y la revisión de ideas, nos podemos preguntar qué tipo de preguntas, afirmaciones o estrategias discursivas concretas lo consiguen. Es decir, qué acciones en el discurso docente fomentan la participación del alumnado en las prácticas de modelización, y más aún, cómo se articulan dichas acciones para lograr encadenar prácticas que promueven objetivos didácticos específicos y el progreso de las ideas del alumnado.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado durante el desarrollo del doctorado del primer autor, el que ha sido financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo / Programa Formación de Capital Humano Avanzado / Beca Doctorado en el Extranjero 72190314.

Este artículo ha sido posible gracias al apoyo de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) (ANID – MILENIO – NCS2021_014, Basal FB0003).

Esta investigación se ha financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2022-138166NB-C22b) y se ha realizado dentro del grupo de investigación SGR ACELEC, ref.2021 SGR 00647”.

Declaración de autoría

Camilo Vergara Sandoval: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, curación de datos, redacción (borrador y original), redacción (revisión y edición), visualización, supervisión.

Víctor López-Simó: conceptualización, validación, recursos, curación de datos, redacción (borrador y original), visualización, supervisión.

Digna Couso: conceptualización, validación, recursos, redacción (revisión y edición), supervisión, administración del proyecto, administración fundadora.

Referencias

Baek, H., Schwarz, C., Chen, J., Hokayem, H., y Zhan, L. (2011). Engaging elementary students in scientific modeling: The MoDeLS fifth-grade approach and

- findings. *Models and modeling: Cognitive tools for scientific enquiry* (pp. 195-218) Springer.
- Bayraktar, S. (2009). Misconceptions of Turkish Pre-Service Teachers about Force and Motion. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(2), 273-291. <https://doi.org/10.1007/s10763-007-9120-9>
- Berland, L. K., y Reiser, B. J. (2011). Classroom communities' adaptations of the practice of scientific argumentation. *Science Education*, 95(2), 191-216. <https://doi.org/10.1002/sce.20420>
- Campbell, T., Oh, P. S., Maughn, M., Kiriazis, N., y Zuwallack, R. (2015). A Review of Modeling Pedagogies: Pedagogical Functions, Discursive Acts, and Technology in Modeling Instruction. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1). <https://doi.org/10.12973/eurasia.2015.1314a>
- Chiu, M.H., y Lin, J.W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y>
- Clement, J. (1989). Learning via model construction and criticism: Protocol evidence on sources of creativity in science. In *Handbook of creativity* (pp. 341-381). Springer.
- Clement, J. (1993). Model construction and criticism cycles in expert reasoning. In the *Proceedings of the Fifteenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Lawrence Erlbaum.
- Clement, J. J., y Rea-Ramirez, M. A. (2008). Model based learning and instruction in science. *Model based learning and instruction in science* (pp. 1-9). Springer.
- Colley, C., y Windschitl, M. (2021). A Tool for Visualizing and Inquiring into Whole-Class Sensemaking Discussions. *Research in Science Education*, 51(1), 51-70. <https://doi.org/10.1007/s11165-020-09962-6>
- DBR Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational researcher*, 32(1), 5-8. <https://doi.org/10.3102/0013189X032001005>
- Demirci, N. (2005). A Study about Students' Misconceptions in Force and Motion Concepts by Incorporating a Web-Assisted Physics Program. *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET*, 4(3), 40-48.
- Dimitriadi, K., y Halkia, K. (2012). Secondary Students' Understanding of Basic Ideas of Special Relativity. *International Journal of Science Education*, 34(16), 2565-2582. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.705048>
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11(5), 481-490. <https://doi.org/10.1080/0950069890110501>
- Duschl, R., y Grandy, R. (2013). Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science. *Science y Education*, 22(9), 2109-2139. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9539-4>
- 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>

- Eriksson, M., Linder, C., y Eriksson, U. (2019). Towards understanding learning challenges involving sign convention in introductory level kinematics. *Physics Education Research Conference (PERC), Washington DC, 1-2 August 2018*.
- Eshach, H. (2014). The use of intuitive rules in interpreting students' difficulties in reading and creating kinematic graphs. *Canadian Journal of Physics*, 92(1), 1-8. <https://doi.org/10.1139/cjp-2013-0369>
- Garrido-Espeja, A. (2016). *Modelització i models en la formació inicial de mestres de primària des de la perspectiva de la pràctica científica* [Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona]. Tesis doctorals en xarxa. <http://hdl.handle.net/10803/399837>
- Garrido-Espeja, A., y Couso, D. (2024). The IPM cycle: An instructional tool for promoting students' engagement in modeling practices and construction of models. *Journal of Research in Science Teaching* 62(2), 391-425. <https://doi.org/10.1002/tea.21979>
- Giere, R. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. University of Chicago Press.
- Gilbert, J., y Justi, R. (2016). Learning Progression During Modelling-Based Teaching. *Modelling-based Teaching in Science Education* (pp. 193-222). Springer.
- Gilbert, J. (2004). Models and Modelling: Routes to More Authentic Science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130. <https://doi.org/10.1007/s10763-004-3186-4>
- Göhner, M., y Krell, M. (2022). Preservice Science Teachers' Strategies in Scientific Reasoning: The Case of Modeling. *Research in Science Education*, 52(2), 395-414. <https://doi.org/10.1007/s11165-020-09945-7>
- Harlen, W., y Bell, D. (2010). *Principles and big ideas of science education*. Association for Science Education.
- Hennessey, S., Rojas-Drummond, S., Higham, R., Márquez, A. M., Maine, F., Ríos, R. M., ... y Barrera, M. J. (2016). Developing a coding scheme for analysing classroom dialogue across educational contexts. *Learning, culture and social interaction*, 9, 16-44. <https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2015.12.001>
- Hennessey, S., Howe, C., Mercer, N., y Vrikki, M. (2020). Coding classroom dialogue: Methodological considerations for researchers. *Learning, Culture and Social Interaction*, 25, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2020.100404>
- Hernández, M. I., 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>
- Herrera, Ll., Garrido-Espeja, A. y López-Simó, V. (2016). *Moviment, forces i energia en un salt de puenting, seqüència didàctica per a l'estudi del moviment*. Publicacions CRECIM
- Izquierdo-Aymerich, M., Espinet, M., García, P., Pujol, R. M., y Sanmartí, N. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias, n° extra*, 79-91.

- Izquierdo-Aymerich, M., Sanmartí, N., y Espinet, M. (1999). Fundamentación y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 17(1), 45-59. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4104>
- Kawalkar, A., y Vijapurkar, J. (2013). Scaffolding Science Talk: The role of teachers' questions in the inquiry classroom. *International Journal of Science Education*, 35(12), 2004-2027. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.604684>
- Khan, S. (2007). Model-based inquiries in chemistry. *Science Education*, 91(6), 877-905. <https://doi.org/10.1002/SCE.20226>
- Krell, M., Walzer, C., Hergert, S., y Krüger, D. (2019). Development and Application of a Category System to Describe Pre-Service Science Teachers' Activities in the Process of Scientific Modelling. *Research in Science Education*, 49(5), 1319-1345. <https://doi.org/10.1007/s11165-017-9657-8>
- Lemke, J. L. (1990). *Talking science: Language, learning, and values*. Ablex Publishing Corporation.
- Liu, G., y Fang, N. (2016). Student misconceptions about force and acceleration in physics and engineering mechanics education. *International Journal of Engineering Education*, 32(1), 19-29.
- López, V., Grimalt-Álvaro, C., y Couso, D. (2018). ¿Cómo ayuda la Pizarra Digital Interactiva (PDI) a la hora de promover prácticas de indagación y modelización en el aula de ciencias? *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 15(3), 1-15. <https://doi.org/10.25267/RevEurekaensendivulgcienc.2018.v15.i3.3302>
- Louca, L. T., y Zacharia, Z. C. (2015). Examining Learning Through Modeling in K-6 Science Education. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 192-215. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9533-5>
- Louca, L. T., Zacharia, Z. C., y Constantinou, C. P. (2011). In Quest of productive modeling-based learning *discourse in elementary school science*. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 919-951. <https://doi.org/10.1002/tea.20435>
- Marzàbal, A., Merino, C., Soto, M., Cortés, A. (2024). Modeling-Based Science Education. En Marzabal, A., Merino, C. (eds) *Rethinking Science Education in Latin-America. Contemporary Trends and Issues in Science Education*, vol 59. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52830-9_13
- Minner, G., Levy, A. J., y Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction-what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474-496. <https://doi.org/10.1002/tea.20347>
- Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Stich, y M. Siegal (Eds.), *The Cognitive Basis of Science* (1.^a ed., pp. 133-153). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511613517.008>
- NRC. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.17226/13165>

- Núñez-Oveido, M. C., Clement, J., y Rea-Ramirez, M. A. (2008). Developing Complex Mental Models in Biology Through Model Evolution. *Model Based Learning and Instruction in Science*, 173-193. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6494-4_10
- OECD. (2019). *PISA 2018: Assessment and Analytical Framework*. OECD publishing. <https://doi.org/10.1787/b25efab8-en>
- Oh, P. S., y Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Oliva, J. M., Aragón, M. D. M., Jiménez-Tenorio, N., y Aragón, L. (2018). La modelización como enfoque didáctico y de investigación en torno a la educación científica. *International Journal for 21st Century Education*, 5(1), 3-18. <https://doi.org/10.21071/ij21ce.v5i1.4156>
- Oliva, J. M. (2019). Distintas acepciones para la idea de modelización en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 37(2), 5-24. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2648>
- Osborne, J. (2014). Teaching Scientific Practices: Meeting the Challenge of Change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177-196. <https://doi.org/10.1007/s10972-014-9384-1>
- Pintó, R., Couso, D. i Hernández, M. (2016). *Moviment de frenada i distància de seguretat a la carretera. Seqüència didàctica per l'estudi del moviment*. Publicacions CRECIM.
- Rea-Ramirez, M. A., Clement, J., y Núñez-Oviedo, M. C. (2008). An instructional model derived from model construction and criticism theory. En *Model based learning and instruction in science* (pp. 23-43). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6494-4_2
- Rebmann, G., y Viennot, L. (1994). Teaching algebraic coding: Stakes, difficulties, and suggestions. *American Journal of Physics*, 62(8), 723-727. <https://doi.org/10.1119/1.17504>
- Ruiz-Primo, M. A., y Furtak, E. M. (2007). Exploring teachers' informal formative assessment practices and students' understanding in the context of scientific inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(1), 57-84. <https://doi.org/10.1002/tea.20163>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., y Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Solé, C., Tena, E., Couso, D. y Hernández, M. (2019). *Investigar sobre la contaminació a l'aula de Secundària*. Material de l'alumnat. Versió 2. Publicacions CRECIM.
- Soto, M., Couso, D., López-Simó, V., y Hernández, M. I. (2017). Promoviendo la apropiación del modelo de energía en estudiantes de 4o de ESO a través del diseño didáctico. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 1(1), 90-106. <https://doi.org/10.17979/arec.2017.1.1.2003>

- Tena, È., y Couso, D. (2023). ¿Cómo sé que mi secuencia didáctica es de calidad? Propuesta de un marco de evaluación desde la perspectiva de Investigación Basada en Diseño. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 20(2). https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i2.2801
- Tena, È., Solé, C., y Couso, D. (2020). ¿Cómo podemos investigar la contaminación atmosférica en las aulas de primaria y secundaria? Una propuesta de indagación basada en la modelización. En VII Seminario Iberoamericano CTS (VII SIACTS).
- Trowbridge, D. E., y McDermott, L. C. (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, 48(12), 1020-1028. <https://doi.org/10.1119/1.12298>
- Upmeier zu Belzen, A., van Driel, J., y Krüger, D. (2019). Introducing a framework for modeling competence. *Towards a competence-based view on models and modeling in science education*, 3-19. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_1
- Vergara, C., López-Simó, V., y Couso, D. (2022). Revisiting the landscape roaming metaphor to understand students' ideas on mammals' and birds' thermal regulation. *Journal of Biological Education*, 56(1), 47-60. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1748894>
- Viennot, L. (1979). Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221. <https://doi.org/10.1080/0140528790010209>
- Williams, G., y Clement, J. (2015). Identifying Multiple Levels of Discussion-Based Teaching Strategies for Constructing Scientific Models. *International Journal of Science Education*, 37(1), 82-107. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.966257>
- Windschitl, M., Thompson, J., y Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>