

Conocimiento docente: ¿modelar la caída libre o un modelo teórico?

Teacher knowledge: modeling free fall or modeling theoretical model?

José Manuel Ruvalcaba Cervantes^{1*}, Ricardo Quintero Zazueta²

¹ CINVESTAV Unidad Monterrey, Vía del Conocimiento 201, Parque PIIT, CP 66600, Apodaca Nuevo León. México.

² Matemática Educativa CINVESTAV, Av. Instituto Politécnico Nacional 2508, San Pedro Zacatenco, CP 07360, Gustavo A. Madero, Ciudad de México. México.

*E-mail: jruvalcabac@cinvestav.mx

Recibido el 30 de septiembre de 2022 | Aceptado el 24 de octubre de 2022

Resumen

En el trabajo reflexionamos en torno a ideas docentes sobre caída libre. Entrevistamos a docentes de física del nivel secundario empleando el experimento mental de Galileo Galilei sobre la caída de cuerpos desde lo alto de la torre de Pisa. Encontramos que los docentes construyen modelos mentales que pueden aludir (1) al modelo teórico ideal galileano como verdad absoluta, (2) a la caída libre en sí misma, (3) al modelo galileano como construcción pensada. Cada docente expresa su modelo conforme su comprensión, piensan y problematizan para validar sus modelos con base en experiencias didácticas y saberes previos. Las ideas docentes se asemejan en contenido a las ideas de caída libre en su origen histórico, pero epistemológicamente difieren al validarse desde la experiencia didáctica.

Palabras clave: Conocimiento docente; Caída libre; Modelos; Profesores de física; Galileo Galilei.

Abstract

We focus on reflecting on teaching ideas about free fall. We interviewed secondary school physics teachers using Galileo Galilei's thought experiment on bodies falling from the top of the Tower of Pisa. We found that teachers build mental models that refer to (1) the Galilean theoretical model as absolute truth, (2) to free fall itself, and (3) to the Galilean model as personal construction. Each teacher builds their model according to their understanding; teachers think, problematize, and validate their models based on didactic experiences and previous knowledge. The teaching ideas are similar in content to the ideas of free fall in their historical origin but epistemologically differ because are validated from the didactic experience.

Keywords: Teacher knowledge; Free fall; Modelling; Physics teachers; Galileo Galilei.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es caracterizar modelos mentales sobre caída libre manifestados por docentes de física en secundaria y determinar en qué medida el contenido de sus ideas se asemejan al origen histórico de las ideas científicas de caída libre.

El estudio del contenido de ideas docentes es parte de las discusiones sobre el conocimiento de contenido del docente, el cual es un dominio general del conocimiento profesional docente definido por la cantidad y organización del conocimiento de la disciplina científica de enseñanza (Shulman, 1986). Las ideas que integran el conocimiento de contenido de los profesores de física en secundaria son de tipo cualitativo, con poca complejidad matemática, similares al origen histórico de las ideas de la física como disciplina científica, denominadas ideas clave en la enseñanza de la física (Deng, 2001).

Las ideas clave en la enseñanza de la física permiten a los profesores elaborar explicaciones y modelar fenómenos físicos, resolver problemas y elaborar predicciones o conjeturas del comportamiento de sistemas físicos. Al estudiar el conocimiento de contenido de los docentes surgen dudas sobre la comprensión real que los profesores tienen sobre fenómenos y situaciones físicas con las que trabajan. Se piensa que las explicaciones, modelos y conjeturas construidas por los docentes se limitan a reconocer información científica, y nos preguntamos si los modelos producto de ideas clave en la enseñanza de la física representan sistemas físicos o modelos teóricos ideales (Ruvalcaba, Gómez, Quintero, 2017; Ruvalcaba, Quintero, Gómez, 2022).

En este marco de discusión, pretendemos responder: ¿en qué medida los modelos mentales construidos por los docentes son similares a una representación de un modelo teórico ideal? Para responder esta pregunta de carácter general estudiamos el caso de la caída libre, con el propósito de caracterizar los modelos mentales construidos por profesores de física de educación secundaria y determinar la similitud de estos modelos con el modelo ideal de Galileo Galilei.

II. MARCO TEÓRICO

El trabajo tiene como objeto de estudio los modelos construidos y manifestados por docentes de física en secundaria, siendo preciso plasmar nuestra postura teórica que, en el proceso empírico y analítico, al momento de realizar el análisis traducimos en observables empíricos (ver apartado B en la sección III Metodología).

Un modelo es, en nuestra concepción, una representación semántica de la realidad física (Giere, 1997; Neressian 2010). Un modelo abstrae elementos de la realidad física para representarla en mayor o menor medida, y es parte del conjunto de elementos que integran teorías científicas. Un modelo tiene propiedades heurísticas, por lo cual, en el ámbito de la didáctica, es preciso diferenciar entre modelo teórico ideal y modelo mental.

El modelo teórico ideal es una fracción del conjunto de representaciones interrelacionadas semánticamente que constituyen teorías científicas; es una representación semántica y abstracta de la realidad física que no puede calificarse por ser exacta o inexacta (Giere, 1997; Neressian, 2010), pero sí por semejanza al sistema físico objeto de representación. El modelo teórico ideal hipotetiza explicaciones y predicciones del comportamiento futuro de sistemas físicos de acuerdo con afirmaciones concretas. Alude a entidades abstractas e idealizadas, más que a objetos reales. Es decir, el modelo teórico ideal es parte de una teoría científica, del saber objetivado, de la cultura humana, y funge heurísticamente para construir otros modelos en el contexto de diversas tareas cognitivas (Giere, 1997).

Un modelo mental es más que relación semántica entre entidades lingüísticas (Giere, 1997; Neressian, 1988; 2010); si bien, al igual que los modelos teóricos ideales, son representaciones similares y parciales de la realidad, los modelos mentales se caracterizan por construirse con *componentes* proposicionales/icónicos y símbolos modales/amodales (Neressian, 2010). Los componentes proposicionales son elementos teóricos; son abstraídos desde modelos teóricos ideales (Giere, 1997), representaciones matemáticas, principios, teorías y leyes físicas; se califican con juicios de verdad y su finalidad es restringir el sistema u objeto físico de representación. Los componentes icónicos son elementos narrativos del modelo mental; abstracciones perceptuales y sensoriales, aunque no exclusivamente en formatos de representacional visual o imágenes. Se califican de exactos o inexactos, y dotan con similaridad al modelo con el sistema físico objeto de representación.

Siguiendo a Nancy Neressian (2010), los símbolos amodales construyen los componentes proposicionales, y los símbolos modales forman los componentes icónicos. Los símbolos modales son "*representaciones análogas de los estados perceptuales desde los cuales son abstraídos*" (Neressian, 2010:98). Los amodales son representaciones abstractas.

Los componentes de los modelos mentales poseen *propiedades* dinámicas, estáticas, temporales e interactivas (Neressian, 2010) que permiten al modelo ser una representación abierta con potencial para ser transformado y manipulado conforme nos exigen las necesidades de comprensión del fenómeno físico o sistema de objeto de modelización. Las propiedades describen relaciones entre los diversos componentes, cambios temporales en los estados en la configuración y estructura del modelo, la simulación mental de su comportamiento, y las relaciones causales del fenómeno representado.

Cuando las propiedades ponen en acción al modelo (es decir, al describirse relaciones causales, estructura y organización del modelo, cambios y secuencias temporales), se movilizan conocimientos de naturaleza tácita que, si bien no son nuevos para la persona que modeliza, se le presentan como tal al tiempo de verbalizarlos y hacerlos explícitos (Szabó, 2010). Los saberes tácitos no se movilizarían, o no estarían disponibles para modelar si se carecen de aspectos narrativos (Neressian, 2010; Ruvalcaba *et al.*, 2022; Szabó, 2010); por ello, la narración debe estimular la movilización de representaciones sensoriales y perceptuales de naturaleza modal y amodal.

III. METODOLOGÍA

El estudio es cualitativo e interpretativo, con la finalidad de construir conjeturas más que ponerlas a prueba. Llevamos a cabo una entrevista de pensamiento en voz alta con 10 profesores mexicanos de física en secundaria, seguida de una entrevista retrospectiva. Durante la entrevista de pensamiento en voz alta se presentó a los docentes una tarea por resolver: el problema que plantea el famoso experimento pensado de Galileo Galilei, situación en la cual diversos cuerpos se dejan caer desde lo alto de la torre de Pisa. El experimento pensado busca poner a prueba la suficiencia y veracidad de la teoría aristotélica del movimiento de graves con base en la exploración y análisis de las causas potenciales de la velocidad de caída de los cuerpos.

La entrevista en voz alta es un acercamiento a los actos superiores de pensamiento, y propicia la oportunidad de acceder a los contenidos de la memoria de largo plazo que son trasladados a la memoria de trabajo (Leighton, 2017). Consiste en solicitar a los participantes emitir sus pensamientos en voz alta conforme resuelven una tarea cognitiva. La tarea debe ser de complejidad regular, evitando ser complicada o trivial, tal que los participantes no aborren la situación o no se limiten a reproducir mecánicamente información. Si durante la ejecución de la actividad los participantes permanecen en silencio por más de tres segundos se les exhorta a emitir sus pensamientos en voz alta. Todos los enunciados expresados por los participantes se graban y transcriben en totalidad para generar un reporte verbal, el cual es una materialización de actos subjetivos de pensamiento.

La entrevista retrospectiva es semiestructurada, se realiza posterior a la entrevista en voz alta con la finalidad de otorgar al entrevistado la oportunidad de explicar, especificar y ampliar sus locuciones iniciales. Es una oportunidad para el entrevistador de conocer detalles de enunciados que durante la entrevista en voz alta le parecieron generales e imprecisos, y profundizar en los contenidos que probablemente el participante conoce, pero no manifestó. Esta entrevista también es grabada y transcrita en totalidad para complementar y anexarse al reporte verbal.

Las entrevistas tuvieron duración promedio de una hora. A cada docente presentamos una serie de cuatro experimentos mentales sobre caída libre, entre ellos el objeto de esta comunicación. Previo al desarrollo de la entrevista se aplicó un problema y entrevista en voz alta como ejercicio de práctica para preparar y familiarizar a los participantes en la actividad por desarrollar.

Los participantes fueron 10 docentes (5 mujeres y 5 hombres) de física en escuelas mexicanas, en la ciudad de Guadalajara. Se seleccionaron por muestreo aleatorio por conveniencia considerando tres criterios: a) tener menos de 10 años de servicio, con ello garantizar su incorporación al sistema educativo público por medio de la evaluación de ingreso al servicio profesional docente; b) ser egresado de una escuela normal; c) haberse formado con el plan de estudios 1999 empleado en las escuelas normales de México.

A. Instrumento para recolectar datos: modelo teórico ideal de Galileo

Galileo Galilei estudió las causas potenciales de velocidad de caída de los cuerpos al analizar dos de los principios básicos de la explicación de Aristóteles para el mismo fenómeno físico:

1. Principio 1: la velocidad de caída es proporcional a la masa de los cuerpos.
2. Principio 2: la velocidad de caída es inversamente proporcional a la resistencia del medio por el cual cae el cuerpo.

Galilei analizó dichos principios aristotélicos con base en las variables: a) cuerpos del mismo material y cuerpos de distinto material; b) cambios de altura; c) en el vacío y otros medios; d) fricción con el medio de caída; e) peso específico y absoluto; f) tamaño y forma de los cuerpos.

El análisis condujo al modelo teórico ideal: en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad. El modelo corresponde a la conclusión emitida en los *Diálogos* (1638) después de años de análisis, iniciado en su obra *De Motu* (1590).

Galileo invita a pensar en la caída de cuerpos desde lo alto de la Torre de Pisa. La situación la adaptamos a una presentación narrativa en la que dos chicos, durante la revolución mexicana, dejan caer distintos proyectiles desde lo alto de la torre de una iglesia. El experimento pensado se adaptó luego de pruebas piloto aplicadas a estudiantes de un posgrado en educación en ciencias. Se enriqueció la narrativa del problema que implica analizar las causas potenciales de velocidad de los cuerpos en caída libre por dos razones: a) porque los docentes manifiestan dificultades para imaginar al experimentar en el pensamiento cuando hay pocos estímulos narrativos (Ruvalcaba, *et al.* 2022); b) porque aceptamos el supuesto de imaginar como acto intencional mediado por herramientas culturales que enriquecen y estimulan el pensamiento racional (Neressian, 2010; Ruvalcaba, Ruiz y Quintero, 2022; Szabó 2010; Vygotsky, 2015).

B. Análisis de datos

A los reportes verbales y las entrevistas retrospectivas las segmentamos y codificamos de acuerdo con el contenido de las sentencias verbalizadas por los docentes. El contenido de las oraciones expresadas por los profesores se analizó con base en nuestro referente teórico, mismo que traducimos en observables empíricos conforme las siguientes categorías para identificar el contenido, estructura, organización y transformaciones de los modelos que construyeron los docentes:

Información proposicional: es la información declarada por los participantes que alude a modelos teóricos ideales, leyes y principios físicos que estructuran y regulan las propiedades de los modelos mentales; son sentencias de naturaleza modal.

Información icónica: son el tipo de sentencias que los participantes expresan para describir el sistema físico u objeto de representación aludiendo a percepciones sensoriales, no necesariamente visuales; son de naturaleza modal y amodal.

Transformación de la información: son las oraciones cuya finalidad es operar con la información proposicional e icónica, esto es, son expresiones que denotan las acciones y operaciones cognitivas de los docentes.

Entidades teóricas: son palabras, frases o términos de naturaleza amodal, e indican las propiedades teóricas de la información proposicional e icónica. Al ser abstractas, describen variables o condiciones de validez del modelo mental.

El análisis por tanto es del tipo *up-bottom*, esto es, con categorías preestablecidas tratamos de leer los datos para construir conjeturas sin buscar poner a prueba la suficiencia y veracidad de una teoría didáctica.

IV. RESULTADOS

Con los reportes verbales y las entrevistas retrospectivas logramos reconstruir tres modelos mentales conforme las categorías descritas en el subapartado B de la metodología (tabla I).

TABLA I. Modelos mentales docentes reconstruidos desde los reportes verbales y entrevistas retrospectivas.

Modelo reconstruido	Docentes
La velocidad de caída de los cuerpos es directamente proporcional a la masa del cuerpo e inversamente proporcional a la resistencia del aire	3
Cuerpos que caen simultáneamente desde la misma altura caen con la misma velocidad, independientemente de sus masas	4
La velocidad de caída de los cuerpos está determinada por la forma del cuerpo, y en relación proporcional inversa con la resistencia del medio, tal que la forma del cuerpo puede contribuir a disminuir la resistencia	3

Sin pretender etiquetar de correctos o incorrectos los modelos mentales de los docentes, es evidente que el primer modelo contiene los principios aristotélicos mencionados en el subapartado A; el segundo y tercer modelo contienen algunas de las ideas y variables analizadas por Galileo Galilei cuando exploró las potenciales causas de la velocidad de caída de los cuerpos, en especial cuando transitó de su conclusión provisional -en el vacío todos los cuerpos caen con una velocidad proporcional a su peso específico- hacia el modelo teórico ideal -en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma aceleración-.

En los reportes verbales y las entrevistas retrospectivas encontramos elementos para etiquetar los modelos mentales que los docentes construyeron de acuerdo con la información enunciada y variables analizadas (tabla II): alusión al modelo teórico ideal galileano; modelo mental de caída libre sin mencionar trabajo de Galileo; y modelos híbridos. La construcción de los modelos expresados por los docentes ocurre en el contexto de pensar y validar una explicación razonable y convincente de las causas potenciales de velocidad de caída de los cuerpos.

TABLA II. Categorías de los modelos docentes construidos por los docentes, variables analizadas y sus formas de validación.

Categoría	Docentes	VARIABLES analizadas	Validación del análisis
Modelo teórico ideal	4	Caída en el vacío y en presencia de aire. Fricción con el medio de caída	Se asume como verdad el modelo Galileano, y la gravedad se considera la variable independiente y determinante de la velocidad de caída de los cuerpos.
Modelo mental del fenómeno	3	Caída en el vacío y en presencia de aire. Fricción con el medio de caída. Cuerpos	Experiencias didácticas (caída de hojas de papel, uso de paracaídas) son empleadas como referentes y modelos análogos para analizar algunas de las variables.

Categoría	Docentes	VARIABLES ANALIZADAS	Validación del análisis
físico de caída libre		de diferente material. Cambios de altura. Tamaño y forma de los cuerpos.	
Modelo híbrido	3	Caída en el vacío y en presencia de aire. Fricción con el medio de caída. Cuerpos de diferente material. Cambios de altura. Tamaño y forma de los cuerpos. Densidad	Se reconoce la veracidad y valor histórico del modelo Galileano, y la gravedad como variable independiente y determinante de la velocidad de caída de los cuerpos. Sin embargo, el modelo galileano no se adopta como verdad hasta explorar las variables analizadas. Experiencias didácticas (caída de hojas de papel, uso de paracaídas, videos, cámara de vacío) son empleadas como referentes y modelos análogos para analizar las variables. Caricaturas y otros elementos culturales producto de la divulgación científica son referentes para ejemplificar los análisis de variables y validar el segundo modelo galileano.

En el primer tipo de modelo los docentes exponen la explicación galileana como verdad absoluta; conciben la gravedad como la variable determinante de la velocidad de caída de los cuerpos. El análisis de las causas potenciales de velocidad de caída es limitado. La tarea se reduce a aseverar y adoptar la idea galileana como verdad inapelable, aunque no la enuncian de manera mecánica, sino que explican y ejemplifican la idea galileana. La categoría contiene los modelos correspondientes con el segundo modelo reconstruido en la tabla I.

En el segundo grupo de modelos, los docentes exploran una mayor cantidad de variables al pensar y validar la principal causa potencial de velocidad de caída de los cuerpos. Para validar las ideas sobre las variables exploradas remiten a experiencias didácticas en las que se describen el tipo de actividades y experiencias vividas en las aulas. La categoría representa los modelos correspondientes al modelo uno reconstruido en la tabla I.

La tercera clase de modelos contienen ideas y variables clave de la caída libre contextualizadas tanto en la historia de la física como en el trabajo en el aula: se asume la veracidad de la explicación galileana pero no se reproduce mecánicamente, se construye y piensa el trabajo de Galileo al problematizar causas potenciales de caída aludiendo a ejemplos didácticos y productos culturales (documentales y obras de divulgación escrita). Esta categoría contiene los modelos correspondientes al modelo tres de la tabla I.

En la tabla II percibimos dos familias de modelos, los que representan un modelo teórico ideal y los que modelan un fenómeno. En la primera familia se construye una versión que explica el modelo teórico ideal galileano, describiendo y ejemplificando dicho modelo teórico ideal, sin poner a prueba idea o variable alguna. La segunda familia contiene las dos categorías de modelos en los cuales los docentes analizan y piensan, en la medida de sus posibilidades, las mismas variables que Galileo estudió como causas potenciales de velocidad de caída, sin necesidad de arribar a la conclusión galileana. En la segunda familia de modelos se ponen a prueba ideas, y se busca validar el análisis conforme actividades que han sido empleadas en el trabajo de aula.

La segunda familia es, con relación al contenido, un análisis semejante al realizado por Galileo ya que se piensan variables semejantes, sin embargo, difieren en cómo justificar empíricamente el análisis, pues la validez de los docentes está dada por referencias a experiencias didácticas y vivencias en el aula al enseñar el contenido; en cambio el análisis galileano pasa por diversas fases, desde el estudio analógico con base en la obra de Arquímedes, hasta las pruebas geométricas.

V. CONCLUSIONES

Al comienzo de este trabajo nos preguntamos en qué medida los modelos mentales construidos por los docentes se asemejan a una representación de un modelo teórico ideal. De acuerdo con nuestra interpretación de los reportes verbales y entrevistas retrospectivas sugerimos un par de conjeturas:

- (1) Los modelos mentales de los docentes son similares a los modelos teóricos ideales de referencia cuando no son justificadas y analizadas las relaciones entre las variables del modelo, cuando se asume como verdad absoluta e inapelable la estructura amodal del modelo teórico ideal, y cuando las alusiones al modelo de referencia poseen mayor cantidad de locuciones en comparación a las menciones del fenómeno o sistema físico objeto de representación. Por ejemplo, el segundo modelo de la tabla I, si bien no reproduce con exactitud el modelo galileano, **corresponde a una modelización que no verifica y justifica las condiciones de validez del modelo de Galileo, en el vacío todos los cuerpos de cualquier material caen con la misma velocidad.**

(2) Los modelos mentales docentes que analizan y ponen a prueba las relaciones entre variables del modelo, y las menciones al fenómeno físico tienen mayor frecuencia, el modelo mental construido por los docentes tiene parecido con el tipo de variables analizadas que dieron origen al modelo teórico de referencia sin que ello implique similitud de conclusiones entre modelo mental docente y modelo teórico ideal. Por ejemplo, los modelos uno y tres en la tabla 1 emergen de analizar y valorar los principios aristotélicos con base en algunas variables estudiadas por el propio Galileo, justificando las relaciones entre las entidades del modelo con base en experiencias didácticas y elementos culturales, justo como se lee en la tabla II para las dos últimas categorías.

Las conjeturas previas habrán de tomarse de manera provisional, pues son generalizaciones más allá del contenido de caída libre analizado en esta comunicación. Será necesario poner a prueba dichas conjeturas para conocer su nivel de generalización. Sin embargo, el hallazgo sugiere la relevancia de la experiencia docente al enseñar un contenido para el dominio mismo del contenido; es decir, el conocimiento docente para construir y justificar un modelo está ligado a la práctica y saber didáctico vivido en el aula por el docente.

Dada la relación encontrada entre la experiencia didáctica del docente con un contenido, y el dominio de dicho contenido, parece necesario continuar con las discusiones sobre los modelos didácticos personales que los docentes construyen a lo largo de su trayectoria profesional. Estas discusiones deberán considerar incrementar las experiencias didácticas en la formación continua de los docentes como vía para fortalecer el conocimiento de contenidos disciplinares, propiciando un análisis y comprensión de los contenidos de los modelos teóricos ideales y sus condiciones de validez, al tiempo que se evita asumir la verdad absoluta e inapelable de la estructura amodal de los modelos teóricos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo con la cátedra Jóvenes Investigadoras e Investigadores por México No. de identificación 13197

REFERENCIAS

Deng, Z. (2001). The distinction between key ideas in teaching school physics and key ideas in the discipline of physics. *Science Education*, 85(3), 263–278. <https://doi.org/10.1002/sce.1009>

Giere, R. N. (1997). *Cognitive Models of Science*. MIT Press

Leighton, J. P. (2017). *Using Think-Aloud Interviews and Cognitive Labs in Educational Research*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199372904.001.0001>.

Neressian, N. J. (1988). *Reasoning from Imagery and Analogy in Scientific Concept Formation*. PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 1988, 41-47.

Neressian, N. J. (2010). *Creating Scientific Concepts*. MIT Press.

Ruvalcaba Cervantes, J. M., Gómez, Galindo, A. A., & Quintero Zazueta, R. (2017). Tipos de conocimientos empleados por los profesores de física al trabajar con experimentos pensados. Memoria electrónica del congreso nacional de investigación educativa. Disponible en: <http://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v14/doc/2478.pdf>

Ruvalcaba Cervantes, J. M, Quintero Zazueta, R., Gómez Galindo, A. A. (2022). Conocimiento de contenido de profesores: el experimento pensado de caída libre de Galileo. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(1), 5-24. DOI 10.1007/s10972-013-9342-3

Ruvalcaba Cervantes, J.M., Ruiz González, H.L., Quintero Zazueta, R. (2022). Imaginación científica escolar: actividad social y cognitiva. *Sincronía*, 26-81. DOI 10.32870/sincronia.axxvi.n81.24a22

Shulman, L. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14. <https://doi.org/10.3102/0013189X015002004>

Szabó, G. T. (2010). *Intuition, imagination & philosophical methodology*. New York: Oxford University Press.

Vygotsky, L. S. (2015). *La imaginación y el arte en la infancia*. David A. Rincón Pérez (Trad.), México: Ediciones Coyoacán.