



Inteligencia artificial generativa y teoría de los campos conceptuales en la enseñanza de la física: aproximación desde una revisión de alcance

Generative artificial intelligence and the theory of conceptual fields in physics education: an approach from a scoping review

Mikael Frank Rezende Junior

Universidade Federal de Itajubá (Brasil)

<https://orcid.org/0000-0002-4622-1998>

mikael@unifei.edu.br

Gabriel Dias de Carvalho Junior

Université de Namur (Bélgica)

<https://orcid.org/0000-0002-1776-1186>

gabriel.carvalho@unamur.be

Fecha de recepción: 16/01/2026 Fecha de aprobación: 11/03/2026 Fecha de publicación: 24/03/2026

Resumen

Este ensayo teórico aproxima la teoría de los campos conceptuales (TCC) de Gérard Vergnaud y la inteligencia artificial generativa (IAG) para explorar sus implicaciones en la enseñanza de la física. A partir de una revisión de alcance exploratoria, se esboza un marco hipotético sobre las condiciones en las que las herramientas de IAG, concebidas como artefactos de mediación, pueden enriquecer la construcción conceptual del estudiantado. El análisis se centra en cómo estas herramientas diversifican las situaciones didácticas y los registros de representación. Como parte de los resultados, se articulan criterios para el diseño de situaciones que favorezcan la conceptualización y contribuyan a identificar riesgos clave. Asimismo, se postula que el potencial de la IAG solo se materializa si su uso, mediado por el docente, transforma el artefacto en un instrumento que permita al estudiante refinar sus invariantes operatorias mediante la acción.

Palabras clave: enseñanza de la física, inteligencia artificial generativa, revisión de alcance, representación, teoría de los campos conceptuales.



Abstract

This theoretical essay brings Vergnaud's Theory of Conceptual Fields (TCF) and Generative Artificial Intelligence (GAI) to explore their implications for Physics education. Based on an exploratory scoping review, this paper outlines a hypothetical framework for the conditions under which GAI, conceived as a mediating artifact, may enrich students' conceptual construction. The analysis focuses on how these tools diversify didactic situations and representational registers. As part of the results, criteria are articulated for designing situations that foster conceptualization, and key risks are identified. Furthermore, it is posited that the potential of GAI is realized only when its use, mediated by the teacher, transforms the artifact into an instrument that enables students to refine their operative invariants through action.

Keywords: generative artificial intelligence, physics education, scoping review, theory of conceptual fields, conceptualization.

Introducción

La reciente irrupción de la inteligencia artificial generativa (IAG), especialmente a través de herramientas como ChatGPT, ha generado un intenso debate en el ámbito educativo, oscilando entre el optimismo sobre sus potencialidades y la preocupación por sus riesgos (Adeshola y Adepoju, 2023; Mai et al., 2024; Mohammadi et al., 2024). Con frecuencia este debate carece de un anclaje teórico sólido sobre cómo ocurre el aprendizaje conceptual. En este contexto, el presente ensayo teórico busca abordar este vacío mediante la propuesta de un ejercicio de aproximación entre el campo tecnológico emergente y la teoría de los campos conceptuales (TCC) de Gérard Vergnaud (1998), la cual constituye un robusto marco de la psicología cognitiva. Se sostiene que la TCC puede ofrecer una lente analítica para explorar las condiciones bajo las cuales la IAG podría, o no, favorecer la construcción de conceptos en la enseñanza de la física.

La elección de la TCC no es arbitraria. Tal como señalan Godino et al. (2016), la teoría de los campos conceptuales permite comprender el aprendizaje del conocimiento científico como una organización articulada de situaciones, esquemas y sistemas de representación. Esta arquitectura resulta especialmente pertinente para examinar las IAG, que operan produciendo transformaciones en distintos registros semióticos (lenguaje natural, imágenes, expresiones formales, entre otras). No obstante, se subraya que el análisis no atribuye a la máquina un proceso de construcción conceptual análogo al de un sujeto humano, sino que se centra en las condiciones de interacción que pueden favorecer o limitar la emergencia de esquemas conceptuales en el estudiantado. De este modo, la discusión se desplaza desde una pregunta genérica sobre si la IA es beneficiosa o perjudicial para la enseñanza de la física hacia una formulación más precisa: ¿bajo qué condiciones una interacción



mediada por la IAG puede constituir una situación didáctica que promueva la conceptualización de la física?

Esta cuestión es particularmente relevante en la enseñanza de la física, una disciplina en la que la comprensión conceptual es fundamental y a menudo difícil de alcanzar (Greca y Moreira, 1998; Lang da Silveira y Moreira, 2006; Machado y Braga, 2020; Oliveira et al., 2017). La capacidad de las IAG para generar explicaciones, resolver problemas y crear representaciones de fenómenos físicos presenta tanto oportunidades como desafíos (Dahlkemper et al., 2023; Ding et al., 2023; Chen y Wan, 2025; Sirmoorkar et al., 2024). Por un lado, podría ofrecer a los estudiantes un acceso sin precedentes a recursos de aprendizaje personalizados. Además, está latente el riesgo de que se fomente una comprensión superficial o la automatización de procedimientos sin un verdadero dominio conceptual.

Según este horizonte, el objetivo del presente ensayo es esbozar un marco hipotético, fundamentado en una revisión de alcance, sobre las condiciones que posibilitarían el uso de la IAG, que permita la trascendencia de la mera ejecución de tareas y se constituya en un andamiaje para la conceptualización. Se busca comprender cómo estas tecnologías pueden ampliar el repertorio de situaciones y representaciones disponibles para el estudiante (Mainali, 2021; Pineda Moreno, 2022; Valiero et al., 2021). En este sentido, cabe plantearse qué implicaciones tiene esto para la formación de sus esquemas e invariantes operatorios.

Sin embargo, para analizar las implicaciones de la IAG en el aprendizaje se recurrió a la teoría de los campos conceptuales (TCC). Este es un marco teórico que modela la construcción del conocimiento como una adaptación progresiva del sujeto a las situaciones o los contextos. Un concepto solo adquiere significado a través de la variedad de situaciones en las que resulta operativo; en tal sentido, la TCC plantea que el campo conceptual es un vasto conjunto de situaciones interconectadas y explica por qué el aprendizaje no es lineal, sino un recorrido complejo. En este contexto, la IAG surge como una tecnología capaz de generar una vasta variedad de situaciones, desafiándonos a gestionar esta nueva profusión didáctica.

Adaptarse a los contextos ocurre mediante el desarrollo de esquemas, definidos por Vergnaud (1998) como la «organización invariante de la conducta para una clase de situaciones dada» (p. 136). Además, el núcleo del esquema contiene los invariantes operatorios: el conocimiento, a menudo implícito, guía la acción del estudiante por medio de conceptos en acto y teoremas en acto. A partir de lo anterior, el aprendizaje ocurre cuando estos invariantes se aproximan al conocimiento científico. En ello reside un riesgo medular, porque una IAG que entrega respuestas correctas puede permitir el éxito en la tarea sin que el estudiante necesite formular o poner a prueba sus propias invariantes, lo que promueve un conocimiento frágil.

Según la TCC los conceptos solo se vuelven explícitos y objeto de reflexión mediante sistemas de representación simbólica que articulan lenguaje, ecuaciones y gráficos. La comprensión



se manifiesta en la capacidad de transitar entre distintas representaciones de un mismo concepto. Esta es la conexión más directa con la IAG, cuya principal funcionalidad es operar con fluidez entre múltiples registros. Es en esta capacidad donde reside su mayor potencial como herramienta de mediación, pero también su mayor riesgo.

Finalmente, en este trabajo la teoría de los campos conceptuales (TCC) constituye el núcleo interpretativo principal, en tanto que define el concepto a partir de la tríada (S–I–R): familias de situaciones que le otorgan sentido (S), invariantes operatorias que orientan la acción (I), y sistemas de representación que permiten su explicitación y tratamiento (R). En esta perspectiva, los esquemas y sus invariantes (conceptos en acto y teoremas en acto) son centrales para comprender cómo el estudiantado actúa, regula y estabiliza significados en situaciones de clase.

Complementariamente se moviliza el aporte de Duval (2006) como un apoyo analítico específico para precisar un punto crítico del componente representacional (R): la necesidad de conversiones consistentes entre registros semióticos (verbal, algebraico, gráfico, etc.) como condición para la comprensión. Así, Duval (2006) no sustituye el marco de la TCC ni introduce una teoría alternativa del aprendizaje, sino que permite refinar el análisis de un aspecto particular: la coherencia interregistros, especialmente relevante en interacciones mediadas por IAG, cuya producción multirrepresentacional no garantiza, por sí misma, la consistencia conceptual.

Desarrollo

Dado que el objetivo de este ensayo es un ejercicio de aproximación teórica entre el campo tecnológico de la IAG y el marco cognitivo de la TCC, la metodología empleada es la revisión de alcance (Scoping Review). Este enfoque es interesante para mapear un campo de investigación emergente e identificar conceptos clave, lo cual se alinea con el propósito exploratorio del trabajo (Arksey y O'Malley, 2007). Así, el propósito no es mapear exhaustivamente toda la producción disponible, ni realizar una evaluación formal de calidad o de riesgo de sesgo, sino construir una articulación conceptual orientada por las categorías de la TCC (situaciones, esquemas e invariantes operatorios y representaciones), a partir de la literatura revisada por pares que permita delimitar condiciones, potencialidades y riesgos del uso educativo de la IAG en la enseñanza de la física.

El proceso consistió en tres fases. Primera, se realizó la búsqueda bibliográfica en las bases de datos Web of Science, Scopus y SciELO, combinando términos relacionados con IAG y educación científica (p. ej., Generative AI, ChatGPT, Large Language Models, Physics Education) con el marco teórico de referencia (p. ej., Theory of Conceptual Fields, Conceptual Fields, Vergnaud), así como términos vinculados a representaciones. Los criterios de elegibilidad incluyeron: (i) artículos revisados por pares; (ii) estudios con aportes teóricos, empíricos o de revisión pertinentes para discutir TCC y representaciones en matemática, física u otras ciencias, o bien, el uso educativo de IAG/modelos de lenguaje en educación científica o en física; y (iii) disponibilidad de información



suficiente para su extracción y síntesis. Se excluyeron editoriales, textos sin aparato metodológico, estudios centrados exclusivamente en desarrollos tecnológicos sin vínculo con la educación, duplicados y versiones abreviadas.

El proceso de selección siguió una lógica de tamizaje progresivo. Inicialmente se recuperaron 193 registros, que se redujeron a 137 tras la deduplicación. Posteriormente, el cribado por título y resumen arrojó 59 estudios para su lectura completa. Tras la lectura íntegra y la extracción estandarizada, se excluyeron 22 registros por no cumplir los criterios de inclusión, lo que dio lugar a un corpus final de 37 estudios. Aunque el corpus no establece una conexión directa entre IAG y TCC, reúne contribuciones relevantes de ambos campos que permiten sustentar la articulación propuesta.

Segundo, los datos de estos artículos se extrajeron y organizaron mediante un proceso de *charting*. Tercero, se realizó una síntesis narrativa en la que los hallazgos de la literatura fueron organizados temáticamente según las categorías de la TCC (situaciones, esquemas, representaciones) para construir nuestro marco.

Finalmente, es importante subrayar que, en coherencia con el objetivo de mapeo conceptual de una revisión de alcance, no se realizó una evaluación formal de la calidad teórica o metodológica de los estudios incluidos. Del mismo modo, y por la misma razón metodológica, no se presenta un cuadro descriptivo exhaustivo que caracterice individualmente los 37 estudios seleccionados. En este trabajo, el corpus no se utiliza con fines de comparación sistemática entre investigaciones ni para producir una cartografía cuantitativa del campo, sino como base para una síntesis orientada por categorías teóricas de la TCC (situaciones, esquemas e invariantes operatorios y representaciones).

Por ello, los estudios se movilizan en función de su contribución a la construcción del marco analítico propuesto, priorizando la identificación de convergencias, tensiones y criterios interpretativos relevantes para discutir las condiciones de mediación didáctica con IAG. Así, el propósito no era ponderar la fuerza de la evidencia empírica, sino identificar y sintetizar las ideas y argumentos presentes en la literatura para fundamentar nuestra articulación teórica. Asimismo, entre los 37 artículos identificados, los que resultan más representativos para sostener los ejes analíticos desarrollados en este ensayo se retoman explícitamente a lo largo del texto y se consignan en la sección de referencias.

Mapeo de artículos

El mapeo de 37 artículos organizó los hallazgos según la TCC (situaciones, representaciones y conversiones, esquemas e invariantes operatorios) en cruce con la literatura reciente sobre IAG en educación científica, especialmente respecto a la educación en física, sin extrapolar más allá de la evidencia examinada.



Potencialidades: la ampliación del campo conceptual y el andamiaje de esquemas

La síntesis de la literatura revela que, cuando el docente lo media críticamente, el uso de la IAG puede enriquecer significativamente el entorno de aprendizaje, principalmente al diversificar las situaciones y al ayudar a explicitar y organizar los esquemas de uso.

En el plano de las situaciones: la literatura en ciencias reafirma que la variedad de familias isoestructurales es una condición de generalización (Vergnaud, 2007; Moreira, 2002; Andres et al., 2006; Greca y Moreira, 2003; Araujo Cunha y Abreu Ferreira, 2020; Panadero y Järvelä, 2015). En este sentido, una potencialidad clave es la posibilidad de emplear la IAG para generar familias de problemas con la misma estructura conceptual, lo que favorece la identificación de invariantes entre variaciones superficiales. Esto es crucial, ya que los estudios con IAG muestran una marcada sensibilidad al tipo de tarea y a la redacción de la consigna (Kortemeyer, 2023a; Kortemeyer, 2023b; López Simó y Rezende Junior, 2024; Bitzenbauer, 2023; Kotsis, 2025).

En el plano de los esquemas: la interacción con la IAG puede promover la aparición de nuevas rutinas de consulta, estrategias de *prompting* y criterios de verificación y control en estudiantes y docentes (Xu et al., 2024; Ng et al., 2024; Ali et al., 2024; Deng et al., 2025; Munaye et al., 2025; Wang y Fan, 2025). Estos esquemas de uso organizan la acción en torno a familias de tareas y regulan la selección de invariantes y representaciones; cuando se hacen explícitos, mejoran la interacción con la IAG y reducen la automatización acrítica.

Riesgos: la incoherencia representacional y la cristalización de invariantes espurios

Frente a las potencialidades de la literatura, emergen riesgos significativos que amenazan directamente la coherencia del conocimiento y la validez de los invariantes operatorios del estudiante.

En el plano de las representaciones y conversiones: aunque la comprensión exige multiplicidad representacional y conversiones consistentes entre representaciones (Duval, 2006), la coherencia entre representaciones en la IAG no está garantizada. Se observan aciertos en una representación y fallas al traducirla a otra, con desajustes entre el texto, la ecuación y el gráfico (Polverini y Gregorcic, 2024; Liang et al., 2023; Polverini et al., 2025). Este constituye un cuello de botella tanto para la IAG como para el estudiantado (Duval, 2006; Polverini y Gregorcic, 2024; Liang et al., 2023). Aunque los *prompts* que piden convertir y justificar aumentan la consistencia, requieren una verificación docente muy atenta y crítica.

En el plano de los invariantes operatorios: de forma alarmante los errores de la IAG en mecánica, por ejemplo, reproducen patrones clásicos de concepciones alternativas, como: *se necesita fuerza para mantener el movimiento* o la confusión entre fuerza y velocidad (Clement, 1982;



McDermott, 1984), documentados tanto en ítems conceptuales como en problemas contextualizados (Kortemeyer, 2023a; López Simó y Rezende Junior, 2024; Kotsis, 2025). Es crucial aclarar que, si bien los *outputs* de la IAG emulan estas concepciones, el mecanismo generativo subyacente es estadístico y no corresponde a la construcción conceptual de un sujeto humano. Sin mediación, la IAG corre el riesgo de cristalizar en el estudiante invariantes espurios. No obstante, esto representa una oportunidad, pues la IAG puede operar como un «espejo cognitivo» para explicitar teoremas en acto y revisarlos frente al modelo científico.

Síntesis y criterios operativos para el diseño didáctico

De forma transversal los resultados convergen en que variar situaciones conservando la estructura conceptual y exigir conversiones con criterios de verificación, aumenta la probabilidad de que emerjan invariantes pertinentes y de detectar los espurios. Esta perspectiva sugiere condiciones operativas para el diseño didáctico relacionado con: (a) construir familias de situaciones con invariantes comunes explícitos, variando el contexto y los datos, (b) demandar conversiones planificadas (de verbal a algebraico, de verbal a gráfico) con comprobaciones de coherencia, (c) protocolizar esquemas de uso que incluyan *prompts*, verificación y contraejemplos y, (d) aprovechar los errores de la IAG como disparadores metacognitivos para explicitar y revisar conceptos y teoremas en acto. Los aspectos anteriores fundamentan la discusión futura sobre las condiciones, límites y criterios para integrar críticamente la IAG en la enseñanza de la física.

Reflexiones

Los aciertos de la revisión invitan a una lectura crítica que articula tanto las potencialidades como los límites de la IAG en la enseñanza de la física. El análisis revela una asimetría fundamental: mientras que las IAG son herramientas extraordinariamente potentes para ampliar el espacio de situaciones y representaciones, no sustituyen ni garantizan los mecanismos cognitivos de conceptualización descritos por la TCC. La emergencia y el ajuste de los invariantes pertinentes siguen dependiendo de esquemas de actividad mediados por el docente.

En cuanto a su potencial, la capacidad de las IAG para generar familias de situaciones, permite variar contextos, datos y narrativas preservando la estructura conceptual, en línea con la exigencia de variedad de la TCC. Sin embargo, como se desprende de los resultados, el valor educativo radica menos en la cantidad de problemas que en su organización. Para que la diversidad no devenga en dispersión, la progresión didáctica debe hacer explícito qué permanece constante y por qué las tareas pertenecen a la misma familia conceptual. Del mismo modo, la multirrepresentación que ofrece la IAG solo se vuelve formativa cuando se exigen y se verifican conversiones consistentes entre representaciones. Siguiendo a Duval (2006), lo crucial no es disponer de más registros, sino



ser capaz de traducir entre ellos preservando las relaciones. La coherencia entre el enunciado verbal, la formulación simbólica y la representación gráfica constituye, como vimos, un cuello de botella tanto para los estudiantes como para la tecnología propia de la IAG actual.

En cuanto a los riesgos, los errores recurrentes de la IA en mecánica, por ejemplo, que reflejan concepciones alternativas clásicas, presentan una doble cara. Por un lado, representan un riesgo claro de cristalizar invariantes espurias si las respuestas, aunque verosímiles, no se contrastan. Por otro lado, abren una vía pedagógica poderosa: usar la IAG como un «espejo cognitivo» para hacer visibles los conceptos y los teoremas en acto por parte de los estudiantes. El diseño didáctico puede, por tanto, convertir el error de la IAG en un disparador metacognitivo para explicitar, contrastar y revisar el conocimiento implícito frente al modelo científico.

Así, es imperativo revalorizar y redefinir la mediación docente como una práctica epistémica insustituible. Desde esta perspectiva, en clave TCC, el profesorado es quien decide qué variar en las situaciones, qué conversiones exigir, con qué criterios validar y cómo regular los esquemas de acción. La IAG se convierte en un instrumento útil solo cuando se inserta en esquemas de uso con metas, retos, reglas y mecanismos de control claros. En tal sentido es necesario que se incluyan pautas de *prompting* orientadas a la coherencia, la verificación cruzada y la búsqueda de contraejemplos

Conclusiones

La TCC puede ofrecer una lente rigurosa para analizar el uso de la IAG en la enseñanza de la física. Desde esta perspectiva, el propósito no es simplemente articular una herramienta tecnológica con una teoría del aprendizaje, sino establecer, a partir de los principios de la TCC, las condiciones didácticas bajo las cuales la interacción con la IAG puede contribuir a la construcción de invariantes operatorios, a la coordinación de representaciones y a la consolidación de esquemas conceptuales, evitando así formas de uso meramente instrumentales o superficiales.

Para reducir la automatización acrítica, es necesario converger en criterios operativos clave, como la planificación de familias en situaciones isoestructurales para promover la generalización; la demanda de conversiones encadenadas entre representaciones de índole verbal, gráfica y algebraica, con una verificación sistemática de su coherencia; asimismo, protocolizar los esquemas de uso, como las estrategias de *prompting*, verificación y contraejemplos.

Un hallazgo central es que los errores recurrentes de la IAG, lejos de ser solo un problema, pueden funcionar como un potente «espejo cognitivo» si son tematizados y contrastados, convirtiéndose en disparadores metacognitivos para que los estudiantes expliciten y revisen sus propias invariantes operatorios. En ningún caso la IAG puede sustituir los procesos de conceptualización descritos por la TCC, ya que pertenecen a órdenes distintas. En el mejor de los casos, puede ampliar el repertorio de situaciones y representaciones bajo la mediación docente.



Referencias

- Adeshola, I., y Adepoju, A. P. (2023). The opportunities and challenges of ChatGPT in education. *Interactive Learning Environments*, 32(10), 6159-6172. <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2253858>
- Ali, D., Fatemi, Y., Boskabadi, E., Nikfar, M., Ugwuoke, J., y Ali, H. (2024). ChatGPT in teaching and learning: a systematic review. *Education Sciences*, 14(6), 643. <https://doi.org/10.3390/educsci14060643>
- Andres M. M., Pesa, M. A., y Moreira, M. A. (2006). El trabajo de laboratorio en cursos de física desde la teoría de campos conceptuales. *Ciência & Educação (Bauru)*, 12(2), 129-142. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132006000200002>
- Araujo Cunha, K. M., y Abreu Ferreira, L. N. (2020). A teoria dos campos conceituais e o ensino de ciências: uma revisão. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 20, 523-552. <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2020u523552>
- Arksey, H., y O'Malley, L. (2007). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8, 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Bitzenbauer, P. (2023). ChatGPT in physics education: a pilot study on easy-to-implement activities. *Contemporary Educational Technology*, 15(3), ep430. <https://doi.org/10.30935/cedtech/13176>
- Chen, Z., y Wan, T. (2025). Grading explanations of problem-solving process and generating feedback using large language models at human-level accuracy. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010126. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010126>
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66-71. <https://doi.org/10.1119/1.12989>
- Dahlkemper, M. N., Lahme, S. Z., y Klein, P. (2023). How do physics students evaluate artificial intelligence responses on comprehension questions? A study on the perceived scientific accuracy and linguistic quality of ChatGPT. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010142. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010142>



- Deng, R., Jiang, M., Yu, X., Lu, Y., y Liu, S. (2025). Does ChatGPT enhance student learning? A systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Computers & Education*, 227, 105224. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105224>
- Ding, L., Li, T., Jiang, S., y Gapud, A. (2023). Students' perceptions of using ChatGPT in a physics class as a virtual tutor. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(63), 2-18. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00434-1>
- Duval, R. (2006). A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 61, 103-131. <https://doi.org/10.1007/s10649-006-0400-z>
- Godino, J. D., Wilhelmi, M. R., Blanco, T. F., Contreras, Á., y Giacomone, B. (2016). Análisis de la actividad matemática mediante dos herramientas teóricas: registros de representación semiótica y configuración ontosemiótica. *Avances de Investigación en Educación Matemática*, 10, 91–110. <https://doi.org/10.35763/aiem.v0i10.144>
- Greca, I. M., y Moreira, M. A. (1998). Modelos mentales y aprendizaje de física en electricidad y magnetismo. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 16(2), 289–304. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4132>
- Greca, I. M., y Moreira, M. A. (2003). Do saber fazer ao saber dizer: uma análise do papel da resolução de problemas na aprendizagem conceitual de física. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 5(1), 52–67. <https://doi.org/10.1590/1983-21172003050106>
- Kortemeyer, G. (2023a). Could an artificial-intelligence agent pass an introductory physics course? *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010132>
- Kortemeyer, G. (2023b). Toward AI grading of student problem solutions in introductory physics: a feasibility study. *Physical Review Physics Education Research*, 19(2), 020163. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020163>
- Kotsis, K. T. (2025). Comparing ChatGPT and deepseek in addressing misconceptions about physics concepts. *European Journal of Contemporary Education and E-Learning*, 3(2), 191-206. [https://doi.org/10.59324/ejceel.2025.3\(2\).17](https://doi.org/10.59324/ejceel.2025.3(2).17)



- Lang da Silveira, F., y Moreira, M. A. (2006). Estrutura interna de testes de cohecimento em física: um exemplo em mecânica. *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas*, 10(2), 187–194. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4667>
- Liang, Y., Zou, D., Xie, H., y Wang, F. L. (2023). Exploring the potential of using ChatGPT in physics education. *Smart Learning Environments*, 10(52), 2-19. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00273-7>
- López Simó, V., y Rezende Junior, M. F. (2024). Challenging ChatGPT with different types of physics education questions. *The Physics Teacher*, 62, 290-294. <https://doi.org/10.1119/5.0160160>
- Machado, J., y Braga, M. (2020). A conceitualização de modelos em física: aproximações e distanciamentos entre as visões de Mario Bunge e Gérard Vergnaud. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 22, e10560. <https://doi.org/10.1590/21172020210109>
- Mai, D. T. T., Da, C. V., y Hanh, N. V. (2024). The use of ChatGPT in teaching and learning: a systematic review through SWOT analysis approach. *Frontiers in Education*, 9, 1328769. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1328769>
- Mainali, B. (2021). Representation in teaching and learning mathematics. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 9(1), 1–21. <https://doi.org/10.46328/ijemst.1111>
- McDermott, L. C. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics Today*, 37(7), 24-32. <https://doi.org/10.1063/1.2916318>
- Mohammadi, M., Tajik, E., Martinez Maldonado, R., Tomaszewski, W., Sadiq, S., y Khosravi, H. (2024). Artificial intelligence in multimodal learning analytics: a systematic literature review. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16241.29281>
- Moreira, M. A. (2002). A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(1), 7-29. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/141212>



- Munaye, Y. Y., Admass, W., Belayneh, Y., Molla, A., y Asmare, M. (2025). ChatGPT in education: a systematic review on opportunities, challenges, and future directions. *Algorithms*, 18(6), 352. <https://doi.org/10.3390/a18060352>
- Ng, D. T. K., Tan, C. W., y Leung, J. K. L. (2024). Empowering student self-regulated learning and science education through ChatGPT: a pioneering pilot study. *British Journal of Educational Technology*, 55(4), 1328-1353. <https://doi.org/10.1111/bjet.13454>
- Oliveira, V., Solano Araujo, I., y Veit, E. A. (2017). Resolução de problemas abertos no ensino de física: uma revisão da literatura. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(3), e3402 <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0269>
- Panadero, E., y Järvelä, S. (2015). Socially shared regulation of learning: a review. *European Psychologist*, 20(3), 190-203. <https://doi.org/10.1027/1016-9040/a000226>
- Pineda Moreno, W. A., Sepúlveda Delgado, O., y Romera López, G. N. (2022). Registros de representación semiótica para la comprensión de la elipse interactuando con GeoGebra. *Revista Boletín Redipe*, 11(3), 258–269. <https://doi.org/10.36260/rbr.v11i3.1719>
- Polverini, G. y Gregorcic, B. (2024). Performance of ChatGPT on the test of understanding graphs in kinematics. *Physical Review Physics Education Research*, 20(1), 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010109>
- Polverini, G., Melin, J., Önerud, E., y Gregorcic, B. (2025). Performance of ChatGPT on tasks involving physics visual representations: the case of the brief electricity and magnetism assessment. *Physical Review Physics Education Research*, 21(1), 010154. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.21.010154>
- Sirnoorkar, A., Zollman, D., Lavery, J. T., Magana, A. J., Rebello, N. S., y Bryan, L. A. (2024). Student and AI responses to physics problems examined through the lenses of sensemaking and mechanistic reasoning. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100318. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100318>



- Valiero, E., Barrionuevo, M., y Villenas, F. (2021). Ordenamiento de los registros semióticos en la didáctica del álgebra en la escuela secundaria. Correspondencia con la enseñanza de expresiones algebraicas racionales. *Educación Matemática*, 33(2), 173–204. <https://doi.org/10.24844/EM3302.07>
- Vergnaud, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *The Journal of Mathematical Behavior*, 17(2), 167–181. [https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(99\)80057-3](https://doi.org/10.1016/S0364-0213(99)80057-3)
- Vergnaud, G. (2007). Représentation et activité: deux concepts étroitement associés. *Recherches en éducation*, 4. <https://doi.org/10.4000/ree.3889>
- Wang, J., y Fan, W. (2025). The effect of ChatGPT on students' learning performance, learning perception, and higher-order thinking: insights from a meta-analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(621). <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04787-y>
- Xu, S., Huang, X., Lo, C. K., Chen, G., y Jong, M. S. (2024). Evaluating the performance of ChatGPT and GPT-4o in coding classroom discourse data: a study of synchronous online mathematics instruction. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100325>