

APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO CRÍTICO Y LA ENSEÑANZA DE LA RELATIVIDAD GENERAL: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Critical meaningful learning and the teaching of general relativity: a systematic review

Edwar Alfonso Castañeda Zapata [edwar.castaneda@udea.edu.co]

Sonia Yaneth López Ríos [sonia.lopez@udea.edu.co]

Jaime Alberto Osorio Vélez [jaime.osorio@udea.edu.co]

Facultad de Educación

Universidad de Antioquia

Cl. 67 #53-108., Medellín, Antioquia, Colombia

Resumen

El aprendizaje significativo y crítico de la relatividad general por parte de los estudiantes es una necesidad inminente gracias a los nuevos descubrimientos en el área de la astrofísica y por su impacto en el ámbito social y tecnológico. El objetivo de este trabajo es analizar la incorporación de los principios de la Teoría del Aprendizaje Significativo Crítico en la educación básica y media, y valorar la posibilidad de implementar estos principios en la enseñanza de la relatividad general. Se aplica el protocolo PRISMA en una revisión sistemática de artículos científicos entre los años 2012 y 2023, proporcionados por bases de datos como Web of Science, Scopus, Dialnet y Google Scholar. Se eligieron artículos en español, inglés y portugués que dieran cuenta de propuestas de intervención en las que se abordaran los principios del aprendizaje significativo crítico para la formación de estudiantes de la educación básica y media. Se analizaron 23 estudios en los que se consideró la implementación de los principios de esta teoría en el aprendizaje de conceptos de ciencias naturales y matemáticas. Se concluye, tras el análisis, que hay un interés en abordar los principios del conocimiento previo, interacción social y del cuestionamiento y la no utilización de la pizarra en estos niveles educativos. En relación con la enseñanza de la relatividad general, su contexto histórico y revolución conceptual permite abordar principios como el desaprendizaje, el conocimiento como lenguaje y la incertidumbre del conocimiento.

Palabras Clave: Aprendizaje Significativo Crítico; Enseñanza de la relatividad general; Revisión sistemática.

Abstract

The critical meaningful learning of general relativity by students is a necessity today due to new discoveries in the area of astrophysics and its social and technological impact. This work aims to analyze the incorporation of the principles of the theory of critical meaningful learning in basic and secondary education and evaluate its possibilities for teaching general relativity. Thus, the PRISMA protocol is applied in a systematic review of scientific articles between 2012 and 2023, provided by databases such as Web of Science, Scopus, Dialnet, and Google Scholar. Research articles in Spanish, English, and Portuguese were chosen that reported on intervention proposals that addressed principles of critical meaningful learning for the training of basic and secondary education students. Twenty-three studies were analyzed in which all or part of the principles of critical meaningful learning is taken into account in the learning of concepts of natural sciences and mathematics was considered. The analysis led us to conclude that there is an interest in addressing the principles of prior knowledge, social interaction and questioning, and the non-use of the blackboard at these educational levels. In relation to learning general relativity, its historical context and conceptual revolution allow us to address principles such as unlearning and the uncertainty of knowledge.

Keywords: Critical meaningful learning; Teaching general relativity; Systematic review.

INTRODUCCIÓN

La Teoría del Aprendizaje Significativo fue propuesta por David Ausubel en 1963 a partir de una serie de valiosas construcciones teóricas acerca de cómo se realiza la actividad intelectual en el ámbito escolar. Para Ausubel, el mecanismo humano de aprendizaje por excelencia para aumentar y preservar los conocimientos es el aprendizaje significativo, tanto en la escuela como en su cotidianidad (Rodríguez, 2011). Concretamente, Ausubel afirmaba que si fuese posible reducir toda la psicología educativa en un solo principio sería este: de todos los factores que influyen en el aprendizaje, el más importante es lo que el estudiante ya sabe. Averigüese eso y enséñese en consecuencia (Ausubel, Novak, & Hanesian, 1983). Para lograr este aprendizaje significativo es clave la interacción entre el conocimiento nuevo y lo que la persona ya sabe. Además, debe existir una predisposición; es decir, un interés por aprender y un material de aprendizaje potencialmente significativo (Moreira, 2021a).

Durante estos 60 años se han llevado a cabo múltiples contribuciones a este constructo (Caballero, 2008; Moreira, 2005; Novak & Gowin, 1984); y aunque la conceptualización inicial de la teoría de Ausubel sigue vigente, Rodríguez (2011) afirma que las investigaciones que han hecho uso de esta teoría de aprendizaje han permitido su evolución, logrando incorporar elementos al ámbito educativo de una manera más eficiente y significativa. Dentro de las visiones contemporáneas del aprendizaje significativo, se encuentra la Teoría del Aprendizaje Significativo Crítico (TASC), la cual busca que el aprendizaje del estudiante no solo sea significativo, sino también crítico, subversivo, antropológico, fundamentado en las ideas de Postman y Weingartner (1969) expuestas en su libro *La enseñanza como una actividad subversiva*. Para Moreira (2005), el aprendizaje crítico es “*aquella perspectiva que permite al estudiante formar parte de su cultura y, al mismo tiempo, estar fuera de ella*” (p. 88). Adquirir el aprendizaje de manera crítica permite que el estudiante forme parte de su cultura de manera activa y pueda desenvolverse en un mundo que se caracteriza por la incertidumbre y la complejidad.

Para lograrlo, Moreira (2005, 2010) presenta unos principios facilitadores de la TASC, los cuales fueron categorizados por López (2014) en principios conceptuales, pedagógico-didácticos y epistemológicos.

Entre los principios conceptuales se encuentran el *principio de la interacción social y del cuestionamiento* (Aprender/ enseñar preguntas en lugar de respuestas); *principio del conocimiento como lenguaje* (Aprender que el lenguaje está plenamente implicado en todos y cada uno de los intentos humanos de percibir la realidad); *principio del aprendiz como perceptor/representador* (Aprender que somos perceptores y representantes del mundo) y el *principio de la conciencia semántica* (Aprenda que el significado está en las personas, no en las palabras).

Los principios pedagógicos incluyen el *principio de la no centralización en el libro de texto* (aprender de diferentes materiales educativos); *principio de la no utilización de la pizarra* (Aprender de diferentes estrategias de enseñanza); *principio del abandono de la narrativa* (Repetir la narrativa de otra persona no fomenta la comprensión y mucho menos la criticidad) y el *Principio del conocimiento previo* (Aprender que aprendemos de lo que ya sabemos).

Los principios epistemológicos abarcan el *principio del aprendizaje por el error* (Aprender que el ser humano aprende corrigiendo sus errores); *principio del desaprendizaje* (Aprenda a desaprender, a no utilizar conceptos y estrategias irrelevantes para la supervivencia) y el *principio de incertidumbre del conocimiento* (Aprender que las preguntas son instrumentos de percepción y que las definiciones y metáforas son instrumentos para pensar).

Para que se logre un aprendizaje significativo, una de las condiciones es que el estudiante tenga un interés para aprender (Moreira, 2021b); sin embargo, se evidencia hoy en día que existe un desinterés de los estudiantes por el aprendizaje de la ciencia y la tecnología (Choudhary et al., 2018). Esto es importante tenerlo en cuenta, ya que el éxito en el aprendizaje está influenciado por muchos factores, entre ellos la disposición del estudiante hacia el conocimiento (Majid & Rohaeti, 2018). Por lo tanto, es indispensable la búsqueda de relaciones entre lo que el estudiante aprende en la escuela, los problemas sociales y su vida cotidiana. Pero esto no sucede realmente, ya que la enseñanza de las ciencias ha estado focalizada en el aprendizaje de ciertos conocimientos específicos sin ninguna contextualización. Además, la ciencia que está mostrando resultados actuales como lo es la mecánica cuántica, la física de partículas o relativista aún está ausente de los currículos de física para la educación básica y media (Kaur et al., 2023).

Como una posible estrategia para favorecer el interés por el aprendizaje de las ciencias, y de manera concreta de la física, algunos autores proponen introducir en la escuela conceptos de la física moderna (Choudhary et al., 2018; Kaur et al., 2020). Incluso, Moreira (2014) afirma que en esta educación contemporánea es indispensable actualizar los contenidos del currículo con la física que surgió a principios

del siglo XX. En esta nueva física se encuentra la teoría de la relatividad formulada por el físico Albert Einstein, quien describe la relación entre el espacio y el tiempo y el papel del movimiento relativo en sus medidas (Einstein, 1905). Diez años después, Einstein extiende su teoría y habla de las distorsiones que sufre el espacio-tiempo, entidad de cuatro dimensiones, por la presencia de masa y energía, dando lugar a la llamada Relatividad General (RG) (Einstein, 1916).

En los últimos años se han confirmado experimentalmente algunas de las predicciones de dicha teoría, como la existencia de las ondas gravitacionales, medidas por el Observatorio de ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés) en el año 2015; y la existencia de los agujeros negros, con la obtención de las primeras imágenes de estas regiones del espacio-tiempo en el año 2019, realizadas por la colaboración del Telescopio de Horizonte de Eventos (EHT, por sus siglas en inglés) (Akiyama et al., 2019). Incluso, se han divulgado otras noticias científicas, como la detección de la estrella más lejana vista observada por el telescopio espacial Hubble en el año 2022. Una noticia que para su comprensión requería conceptos vinculados a la relatividad de Einstein: espacio-tiempo, deformación del espacio y lentes gravitacionales (De la Cruz, 2022).

Ya algunos autores han encontrado que la teoría de Einstein y la astronomía son contenidos que interesan y mejoran las actitudes de los estudiantes hacia la física (Boyle, 2019; Ferreira, Lessa, Da Silva, Paulucci, & Ferreira, 2021; Kaur, Blair, Moschilla, Stannard, & Zadnik, 2017b; Pitts, Venville, Blair, & Zadnik, 2014). Si bien estos temas no se abordan en la mayoría de los currículos de secundaria en el mundo, por varios motivos, entre los que sobresalen su complejidad matemática o su lenguaje contraintuitivo (Dua, Blair, Kaur, & Choudhary, 2020), han surgido estudios en algunos países interesados en llevar estas ideas de Einstein a la educación básica y media. Así mismo, por motivo de las investigaciones modernas en torno a la RG, aparecen algunos proyectos de investigación que han aportado reflexiones importantes sobre la enseñanza y aprendizaje de la RG en estos niveles educativos; incluso, han realizado trabajos de investigación en conjunto (Choudhary et al., 2019). Entre estos están los proyectos Einstein-First, formado por un grupo de físicos y profesores de física en Australia (Adams, Dattatri, Kaur, & Blair, 2021; Choudhary et al., 2020; Foppoli et al., 2019; Kaur, Blair, Moschilla, Stannard, & Zadnik, 2017a; Kaur et al., 2017b; Kaur et al., 2020; Kersting, Schrockner & Papantoniou, 2021) y el proyecto educativo ReleQuant, que desarrolla entornos de aprendizaje digital para estudiantes de secundaria superior en Noruega (18-19 años) (Kersting & Steier, 2018; Kersting, Henriksen, Vetleseter, & Angell, 2018; Henriksen et al., 2014).

Si bien, los nuevos descubrimientos en torno a la RG han motivado a profesores e investigadores a proponer iniciativas para enseñarla en los niveles de educación básica y media, también es importante analizar el papel de esta teoría en la alfabetización científica y tecnológica (CyT) en los estudiantes del siglo XXI. Dicha alfabetización tiene que ver con la capacidad de una persona para comprender ideas básicas sobre ciencia y tecnología, y pueda participar en debates sociales acerca de estos (Ortega & Gil, 2019; Vázquez & Manassero, 2012). Esta se constituye en un pilar fundamental de la Educación en Ciencias (García-Carmona, 2021; McComas & Clough, 2020), y va más allá de la apropiación del lenguaje de estas disciplinas. El por qué y para qué de ese conocimiento científico y tecnológico son elementos indispensables para una buena formación en ciencia y tecnología.

Y precisamente, la mayoría de las investigaciones se enfocan en enseñar los conceptos de la RG (Park, Yang, & Song, 2019), y existen pocas reflexiones en torno a su papel para promover, por ejemplo, el aprendizaje del conocimiento epistémico (justificación de ese conocimiento y entender la ciencia como una práctica) (OECD, 2019). Por tal motivo, es importante reflexionar sobre la necesidad de que el aprendizaje de la RG se adquiera de manera crítica, y que el estudiante pueda encontrar vínculos entre su realidad y el conocimiento que aprende en la escuela, además de cuestionar el impacto de ese conocimiento en la sociedad. Esto es crucial para que pueda tomar decisiones responsables en cuestiones de ciencia y tecnología, algo acorde a la alfabetización en CyT que se requiere en tiempos contemporáneos (Ortega & Gil, 2019; Marín, 2021).

Lo anterior permite inferir que el pensamiento crítico y la reflexión sobre la naturaleza de la ciencia (NdC), son aspectos importantes de esta alfabetización en CyT e invita a que la enseñanza y aprendizaje de la RG también esté orientado a este propósito. Por supuesto, aunque ya existen iniciativas para impulsar la enseñanza y el aprendizaje de la RG en la educación básica y media utilizando diferentes estrategias y metodologías, incluso desde el aprendizaje significativo de Ausubel (Ferreira et al., 2021) y valorando los contextos históricos y filosóficos en los que surge la relatividad (Levrini, 2014), se quiere en el presente artículo explorar las posibilidades que puede tener la enseñanza de la RG para desarrollar en los estudiantes aprendizajes significativos y críticos de sus conceptos, principios y aplicaciones. Aquí el papel de la TASC puede contribuir a este propósito a partir de sus principios facilitadores, teniendo en cuenta que estos contribuyen a las reflexiones pedagógicas, conceptuales y epistemológicas en el aula (López, 2014).

Por tal motivo, el principal objetivo de este trabajo es realizar una revisión sistemática de literatura y analizar la incorporación de los principios del TASC en la enseñanza de las ciencias en la educación básica y media, y valorar la posibilidad de implementar estos principios para la enseñanza de la RG; dando lugar a las siguientes preguntas:

1. ¿Qué principios de la TASC se han contemplado en las investigaciones en didáctica de las ciencias para su enseñanza en la educación básica y media?
2. ¿Qué principios de la TASC se pueden incorporar en una propuesta de enseñanza de la RG en la educación básica y media?

MÉTODO

Estrategia de búsqueda

Se realizó una revisión sistemática de investigaciones en enseñanza que incluyen la TASC en la educación básica y media, y en especial para favorecer el aprendizaje de la RG. Con este fin, se aplicaron los criterios propuestos en el protocolo Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA, Page et al., 2021). Se realiza una búsqueda por palabra clave, resumen, título o tópico en Web of Science (Topic), Scopus (Title-Abs-Key), Dialnet (contiene las palabras) y Google Scholar por ser de acceso institucional. Los descriptores que se utilizaron fueron los siguientes: “Critical meaningful learning”, “general relativity”, “Critical meaningful learning AND General relativity” (también las correspondientes palabras en español y portugués fueron usadas en la búsqueda). La última búsqueda se realizó entre el 15 de agosto y el 20 de septiembre de 2023.

Los criterios de inclusión y exclusión para determinar los estudios objeto de la revisión se muestran en la tabla 1. Allí se determina que el periodo de búsqueda fue de 2012 a 2023 con el propósito de obtener información actualizada de los estudios, y se extendió hasta el año 2012 por motivo de la falta de estudios que estuvieran orientados a la enseñanza de la RG en los niveles de educación básica y media. En relación con el idioma, la mayoría de los trabajos que se enmarcan en la TASC se encuentran en portugués o español y los relacionados con la enseñanza de la RG en inglés. También es importante resaltar que la población se extiende hasta los estudiantes de educación básica (incluye primaria y secundaria) porque hay una iniciativa de enseñar la física de Einstein a los estudiantes más jóvenes, con el argumento de que evitaría en ellos conflictos conceptuales al querer reemplazar los conceptos newtonianos por los de Einstein (Choudhary et al., 2018; Kaur et al., 2023). Igualmente, desde el componente epistemológico de la alfabetización en CyT, algunos autores muestran que la edad o el nivel de escolaridad no es un impedimento para abordar aspectos de NdC; incluso, añaden que la enseñanza de NdC debe iniciar cuando se inicia la enseñanza de las ciencias en la escuela (Avsar & Akerson, 2022)

Tabla 1- Criterios de inclusión y exclusión para la revisión sistemática.

Crterios	Inclusión	Exclusión
Idioma	Español, inglés y portugués	Otras lenguas como mandarín o alemán
Año de publicación	Últimos 12 años (2012, agosto de 2023)	Trabajos publicados antes de 2012 y después de 2023
Tipología	Artículos de investigación	Tesis, trabajos de grado, capítulos de libros y actas de congreso.
Población	Estudiantes de básica y media	Profesores y estudiantes universitarios
Contenido	Estudios con propuestas pedagógicas que incluyen los principios de la TASC	Publicaciones que no incluyan la TASC
Disponibilidad del texto	Estudios con texto completo	Textos solo con resúmenes

Posteriormente, se procede a identificar los estudios a partir de cada uno de los descriptores propuestos. Los resultados de esta primera fase se muestran en la tabla 2.

Tabla 2- Resultados obtenidos en cada base de datos.

Base de datos	Descriptorios	Total artículos	Total artículos después de aplicar filtros
Dialnet plus	Critical meaningful learning	1695	482
	General relativity	37.734	875
	Critical meaningful learning AND General relativity	173	7
Web Of Science	Critical meaningful learning	1847	676
	General relativity	25880	59
	Critical meaningful learning AND General relativity	0	0
Scopus	Critical meaningful learning	2932	936
	General relativity	28165	107
	Critical meaningful learning AND General relativity	0	0
Google Scholar	Critical meaningful learning	2780000	86848
	General relativity	8230	4230
	Critical meaningful learning AND General relativity	180000	18400

Después de aplicar los filtros de búsqueda, se eliminaron los duplicados utilizando Mendeley para los artículos pertenecientes a Scopus y Web of Science, quedando un total de 112350.

En la segunda fase, se leyeron los títulos y resúmenes que respondieran las preguntas de la investigación. Se excluyeron 112320 porque no eran trabajos que incluían la TASC para la enseñanza y aprendizaje de las ciencias en la educación básica y media. Por lo tanto, los estudios recuperados son 30.

Se hizo la búsqueda de cada artículo y se recuperó la totalidad. De esta manera, se obtuvieron 30 artículos para lectura a texto completo. Después de leer cada texto, se excluyeron algunas investigaciones por los siguientes motivos: estaban dirigidos a estudiantes universitarios o maestros en formación; no había propuestas didácticas concretas para abordar los aspectos de la TASC en el aula o no eran claros con su tratamiento. De esta manera, se seleccionaron 23 publicaciones para la revisión.

En la Figura 1 se observa el proceso realizado para la selección de artículos, siguiendo el protocolo PRISMA (Page et al., 2021).

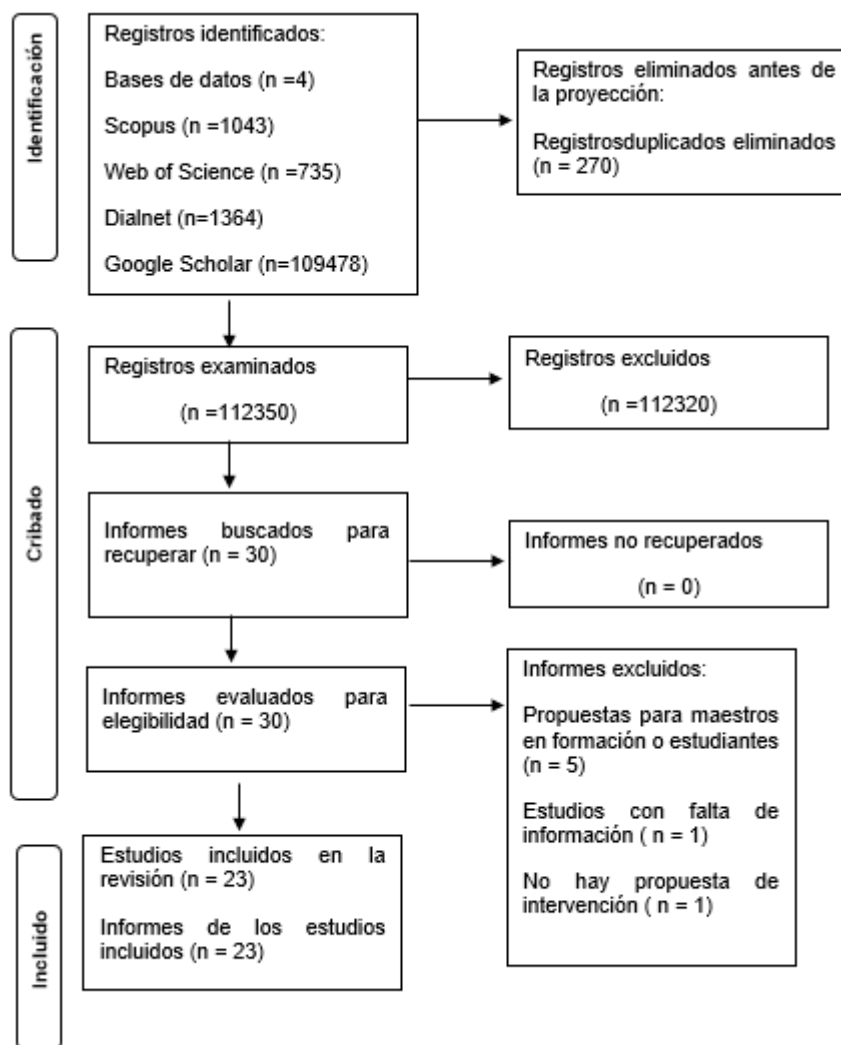


Figura 1- Diagrama de flujo para la selección de artículos. Adaptado de PRISMA 2020

RESULTADOS

En la tabla 3 se presenta el total de publicaciones encontradas y los países donde se llevaron a cabo dichas investigaciones. Como se observa, la mayoría de los estudios están en Brasil.

Tabla 3- Artículos por país.

País	Número de artículos
Brasil	18
Colombia	5
Total	23

Con el propósito de sistematizar la información de las publicaciones seleccionadas, se usa el software Microsoft Excel para recopilar y analizar los datos de cada estudio. La tabla 4 muestra las características principales de los estudios seleccionados para la educación básica y media. Es importante precisar que se tienen en cuenta los conceptos científicos porque se quiere identificar aquellos estudios que están dirigidos a la física moderna y contemporánea, especialmente a la RG; lo que permitirá responder la segunda pregunta del estudio. En cuanto a los recursos o medios didácticos, estos juegan un papel importante en esa predisposición del estudiante para aprender, además es una de las carencias que existe para la enseñanza

de la RG. Con referencia a la población, los estudios estuvieron dirigidos a estudiantes de educación básica, con edades entre los 5 y 14 años, o educación media, entre los 15 y 18 años. Por último, se identifican los principios de la TASC que se abordaron en los estudios y que son fundamentales para responder las dos preguntas de la presente investigación.

Tabla 4- Principales ideas de los estudios seleccionados.

Autores	Población (Nivel educativo)	Conceptos abordados	Medios o recursos didácticos	Principios TASC
Batista & Caldas, 2023	Básica	electromagnetismo	Rotación por estaciones (uso de simulaciones, experimentos, juegos y videos,)	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, de la no centralización en el libro de texto
De Almeida, Melo, & De Freitas, 2023	Básica	Calorimetría	Plataforma Arduino, experimentos, simulaciones, imágenes orientadoras	Principio del conocimiento previo
Cândido, Meneses, Greca, & Rizzatti, 2023	Básica	Calor y temperatura	Mapas conceptuales	Principio del conocimiento previo
Nóbrega, Ferst & Cândido, 2023	Básica	Residuos sólidos	Mapas conceptuales	Principio del conocimiento previo
Galeano, 2023	Básica		Videos, presentaciones, plataforma Moodle, libro interactivo	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, principio de la no centralización en el libro de texto, principio del aprendiz como perceptor/representador, principio del conocimiento como lenguaje, de la conciencia semántica, de la no utilización de la pizarra, del abandono de la narrativa.
Dos Santo & Porto, 2022	Básica	Túnel cuántico, reflexión total interna, óptica	Analogías y experimentos	Principio del conocimiento previo
Galeano, 2022	Básica	Vacuna Covid-19	Presentaciones, carteleras, plegables, videos	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y el cuestionamiento, la no centralización del libro de texto, del aprendiz como perceptor-representador, de la conciencia semántica, principio del desaprendizaje, de la no utilización de la pizarra, del abandono de la narrativa
Guilis, Filho, Ferreir, Carvalho, & Martins, 2021	Básica	Fotosíntesis	Mapas conceptuales	Principio del conocimiento previo
Chirone, Moreira, & Sahelices, 2021a	Básica	Ecuaciones de segundo grado	Tabla digitalizadora con la aplicación Autodesk Sketchbook, El Knowledge Trail	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, de la no centralización en el libro de texto, del aprendiz como perceptor/representador, del conocimiento como lenguaje, de la conciencia semántica, del aprendizaje por el error, del desaprendizaje, de incertidumbre del conocimiento, de la no utilización de la pizarra, del abandono de la narrativa
Chirone, Moreira, & Sahelices, 2021b	Básica	Números y conjuntos	---	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, de la no centralización en el libro de texto, del aprendiz como perceptor/representador, del conocimiento como lenguaje, de la conciencia semántica, del aprendizaje por el error, del desaprendizaje, de incertidumbre del conocimiento, de la no utilización de la pizarra, del abandono de la narrativa
Da Cruz, Santos, Rocco, Villar, & Dos Santos, 2021	Básica	Drogas inhalantes		Principio del conocimiento previo; aprendiz como perceptor/representante del mundo

Autores	Población (Nivel educativo)	Conceptos abordados	Medios o recursos didácticos	Principios TASC
Santana, Rodrigues, Aquino, França, & Aquino, 2021	Básica	Isótopos y radioisótopos	Herramienta TAPEQUIM, tabla periódica digital	Principio del conocimiento previo, la no centralidad del libro de texto, el principio de desaprendizaje, la no centralidad de la pizarra, la narrativa más centrada en el estudiante
Müller & Damasio, 2020	Básica	Física nuclear y de partículas	Cine	No precisa
Cândido, Meneses, & Greca, 2020	Básica	Calor, estados de la materia, evaporación y condensación.	Experimentos	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, de la no centralización en el libro de texto, conocimiento como lenguaje, principio de conciencia semántica, aprendizaje por error, incertidumbre del conocimiento, de la no utilización de la pizarra, principio del abandono de la narrativa.
Palandi, Calheiro, & Del Pino, 2019	Media	Radiación	Mapa conceptual, vídeos, exposiciones, muestras de foto, cuestionarios	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, aprendiz como perceptor/representador, del conocimiento como lenguaje, principio de la no utilización de la pizarra, principio del abandono de la narrativa.
Lamar & Bolívar, 2019	Básica	Primera Ley de la termodinámica	Experimentos Laboratorio virtual	El principio del conocimiento previo.
Martíne, 2019	Básica	Energía	Presentaciones, maquetación, aplicaciones	Principio del conocimiento previo, principio de la interacción social y del cuestionamiento, aprendiz como perceptor/representador, del conocimiento como lenguaje, de la no utilización de la pizarra, del abandono de la narrativa.
Betancur, Pulgarín, & Velásquez, 2019	Media	Color, óptica	Sistema de adquisición de datos	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y cuestionamiento, del desaprendizaje, de la no utilización de la pizarra.
Flores & Silva, 2019	Básica	Números racionales: Juego de fraccionarios	Juegos de computadora, juego de fraccionarios	Principio del conocimiento previo, de la no centralización en el libro de texto, aprendizaje por error, de la no utilización de la pizarra.
Hammel, Miyahara, & Dos Santos, 2019	Básica	Espectro electromagnético	Simulaciones, vídeos, experimentos, mapas conceptuales	Principio del conocimiento previo, de la interacción social y del cuestionamiento, de la no centralización en el libro de texto, principio perceptor/representador.
Ferreira, Dos Santos, Alvarenga, 2018	Media	Las basuras, modelación matemática	Modelación matemática	Principio de interacción social y cuestionamiento, de no centralidad del libro de texto, del aprendiz como perceptor/representante del mundo, de conciencia semántica, del conocimiento como lenguaje, de aprender del error, de desaprendizaje, de incertidumbre del conocimiento.
Betetti, Damasio, & Rodrigues, 2014	Básica	Relatividad: espacio-tiempo curvo, agujeros negros, dilatación gravitacional del tiempo), radioactividad y Física clásica	Experimentos, vídeos, debates y dinámicas de grupo, textos, analogía de la lámina de látex	El principio del conocimiento previo.
Pacheco & Damasio, 2014	Básica	Óptica, colores, arcoíris, astronomía	Experimentos, vídeos	No precisa

La figura 2 muestra los principios de la TASC que han sido tratados con una clara intención de ser incorporados en la educación básica y media. Se resalta la importancia que tiene el conocimiento previo en los diferentes estudios.

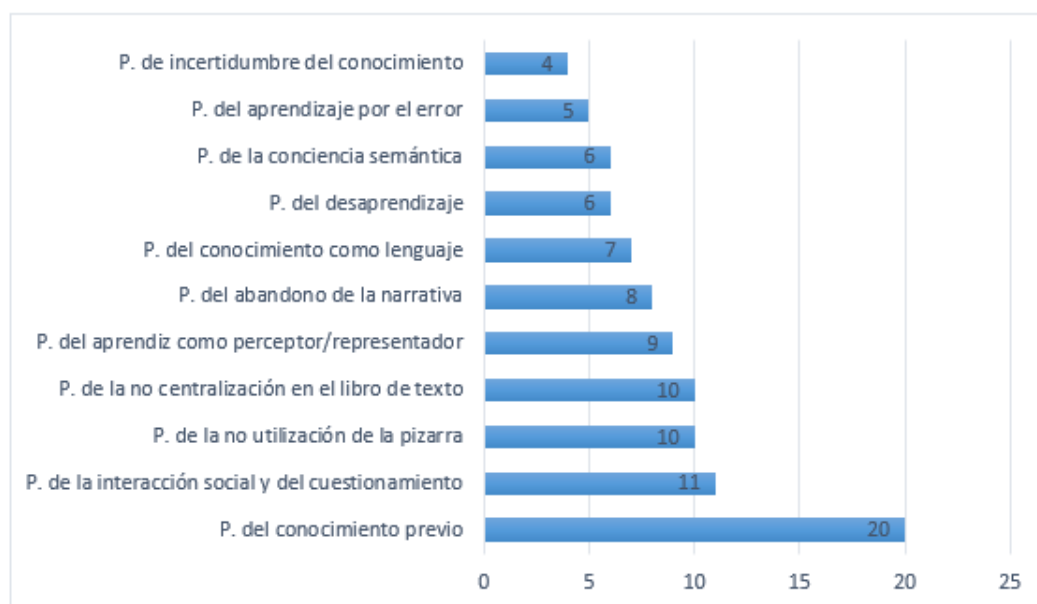


Figura 2- Principios de la TASC en los diferentes estudios.

DISCUSIONES

A continuación, se discuten los resultados en relación con la inclusión de los principios de la TASC en la educación básica y media, y se analiza su abordaje para un aprendizaje significativo y crítico de la RG.

Principios de la TASC en la enseñanza de las ciencias en la educación básica y media.

La revisión sistemática permitió identificar el abordaje de los principios de la TASC en los estudios; sin embargo, se identifican varios aspectos a tener en cuenta. En primer lugar, estos estudios se distinguieron por considerar, bien sea la totalidad de los principios de la TASC (Chirone et al., 2021a, 2021b; Ferreira et al., 2018; Palandi et al., 2019), o se incluyeron de manera parcial para enseñar un contenido específico (Batista & Caldas, 2023; Betancur et al., 2019; Cândido et al., 2023; Betetti et al., 2014, ; Da Cruz et al., 2021; De Almeida et al., 2023; Dos Santo & Porto, 2022; Flores & Silva, 2019; Galeano, 2022, 2023; Guilis et al., 2021; Hammel et al., 2019; Nóbrega et al., 2023; Santana et al., 2021). Hay otros estudios que toman como marco teórico la TASC, pero no especifican los principios en la propuesta didáctica (Müller & Damasio, 2020; Pacheco & Damasio, 2014). En los estudios donde se contemplaron todos los principios de la TASC, los autores analizaron la presencia de dichos principios en cada una de las respuestas de los estudiantes, buscando con esto, valorar si el aprendizaje además de ser significativo también era crítico. Fue así como Ferreira et al., 2018, por ejemplo, argumentaron que la modelación matemática en el ámbito de la Educación Matemática Crítica contribuye al aprendizaje significativo crítico.

En segundo lugar, también se evidencia en la revisión que unos principios tuvieron una mayor presencia que otros en los estudios. Los resultados muestran que el principio del conocimiento previo es el que sobresale en los estudios consultados (87 % de los estudios), considerándose clave para lograr un aprendizaje significativo. En términos prácticos, Moreira (2005) afirma que una manera de tener en cuenta este conocimiento previo es incorporando algunos de los principios de la TASC en la práctica educativa. Por ejemplo, autores como Santana et al. (2021) y Ferreira et al., 2018, concuerdan que el principio de la interacción social y del cuestionamiento permite tener en cuenta los conocimientos previos de los estudiantes, ya que, por medio del cuestionamiento, los estudiantes pueden partir de sus nociones intuitivas.

Igualmente, el principio de la interacción social y del cuestionamiento sobresale en los diferentes estudios y esto tiene que ver con la importancia de la socialización del estudiante para lograr un aprendizaje significativo y crítico. La manera en que algunos autores trabajan este principio es a partir de la formulación de preguntas coherentes y relevantes por parte de los estudiantes, diferenciándose de un aprendizaje mecánico en donde sobresale la transmisión de respuestas (Batista & Caldas, 2023).

En relación con los principios pedagógico-didácticos, se observa un interés de los autores por el uso de diversos materiales o estrategias para enseñar los diferentes contenidos, como diseños experimentales,

exposiciones de fotos y videos, aprendizaje basado en proyectos, entre otros (Betteti et al., 2014; Lamar & Bolívar, 2019; Pacheco & Damasio, 2014). Igualmente, se evidencia el uso de herramientas digitales para favorecer un aprendizaje significativo y crítico, principalmente en las áreas de matemáticas, química y física (Chirone et al., 2021a, 2021b; Flores & Silva, 2019; Hammel et al., 2019; Santana et al., 2021). Se resalta el trabajo de Santana et al. (2021) quienes, utilizando herramientas tecnológicas, lograron relacionar los contenidos específicos de la radioactividad con la tecnología y la sociedad, permitiendo con esto una enseñanza de saberes actualizados y contextualizados. Sus resultados mostraron que los estudiantes lograron construir un conocimiento más profundo y desarrollar destrezas y habilidades previstas en los currículos para la enseñanza media en Brasil. Este es fundamental tenerlo en cuenta ya que enseñar ciencia partiendo del contexto del estudiante se constituye en una necesidad para las instituciones educativas. Esto se debe a que cada vez menos estudiantes están interesados en estudiar carreras que involucran la ciencia y la tecnología (Beltrán & Marín, 2017).

Ahora, si se analizan los resultados en relación con la alfabetización en CyT, curiosamente los principios epistemológicos son los que menos se trabajaron en los estudios. Esto concuerda con otros estudios en los que se manifiesta que la enseñanza de los asuntos asociados a la NdC, que incluye reflexiones epistemológicas, todavía es escasa en la mayoría de los países, principalmente en Iberoamérica (García-Carmona, 2015). Esto por supuesto lleva a que hoy en día la comprensión de la NdC por parte de los estudiantes sea en general bastante limitada (García-Carmona, 2021).

No obstante, a este poco abordaje de estos principios, algunos autores tuvieron en cuenta el principio de la incertidumbre y el principio de desaprendizaje. Con relación a este último principio, está el estudio de Santana et al. (2019), quienes precisan que los estudiantes tuvieron un desaprendizaje al entender que la radioactividad no está relacionada solo con desastres naturales, sino que tiene unos beneficios tecnológicos para la sociedad. Por otra parte, el principio de la incertidumbre del conocimiento aparece, por ejemplo, en el trabajo de Ferreira et al., 2018, quienes manifiestan que dicho principio es uno de los más difíciles de trabajar en una clase de matemáticas tradicional; aunque si se hace desde la modelación matemática, el estudiante puede reflexionar sobre lo inexacto de esta ciencia.

Este último principio se relaciona con uno de los aspectos de la NdC y tiene que ver con la tentatividad del conocimiento científico (Lederman, 2007), es decir, que el conocimiento es incierto, cambiante y que los conocimientos no se pueden enseñar como verdades absolutas. De la misma manera, el principio del aprendizaje por error, que también se trabajó poco en los estudios revisados, se relaciona con el aspecto epistemológico denominado *el error en la ciencia* (Cobo, Abril, & Ariza, 2019) el cual también permite entender la dinámica de la ciencia y cómo evolucionan los conceptos.

Entre los principios conceptuales de la TASC que se abordaron en los estudios, está el principio del conocimiento como lenguaje, el cual se relaciona con la componente de la alfabetización en CyT que tiene que ver con la comprensión de la ciencia, ya que ambos enfatizan la importancia de comprender y tener un dominio del saber disciplinar. Por ejemplo, en el trabajo de Ferreira et al., 2018, los autores muestran la importancia de este principio, al resaltar que el lenguaje de las matemáticas podría ser trabajado como un medio para evaluar el mundo y comprender la realidad. En este sentido, Moreira (2005) resalta que para aprender un conocimiento de manera significativa y crítica es crucial aprender su lenguaje. Así mismo, Lederman y Lederman (2014) también afirman que, para tener un estudiante alfabetizado científicamente, “es importante que tengan una comprensión funcional del contenido científico” (p. 617).

La TASC y la enseñanza de la relatividad general

En esta revisión sistemática se encontraron estudios que estaban dirigidos a la enseñanza de la RG en la educación básica y media (Postiglione & De Angelis, 2021a; Kersting, Schrocker, & Papantoniou, 2021; Adams et al., 2021; Ruggiero, Mattiello, & Leone, 2021; Choudhary et al., 2020; Boyle, 2019; Da Rosa, Giacomelli, Da Rosa, & Biazus, 2017; Kaur et al., 2017a). Sin embargo, solo el trabajo de Betteti et al. (2014) Damasio & Rodrigues (2014) tiene como referente de aprendizaje la TASC para abordar conceptos de la RG.

En ese estudio, los autores propusieron una unidad de enseñanza potencialmente significativa (UEPS) para abordar conceptos de la Relatividad Especial (RE) y RG, con el fin de articularlos con algunos conceptos de la física clásica. De la RG enseñaron los conceptos de agujeros negros, curvatura del espacio-tiempo y gravedad. En cuanto a los materiales y recursos utilizados en la propuesta, los autores usaron el experimento de la lámina de látex para conceptualizar el espacio curvo, con el propósito de explorar los conocimientos previos de los estudiantes. Este experimento consiste en colocar un objeto sobre una lámina y analizar su deformación; luego se lanzan objetivos de menor masa, por ejemplo, canicas y estas se mueven en torno a la masa central, simulando el movimiento planetario. En esta propuesta se logra identificar que los

autores abordaron el principio del conocimiento previo. Pero encontraron que la propuesta no despertó en los estudiantes la predisposición por aprender los conceptos de la teoría de Einstein, pese al uso de diversos materiales y estrategias didácticas. Esto llevó a que los estudiantes vieran los conceptos de la RG demasiado abstractos sin atribución de significado, traducándose en un aprendizaje mecánico. Finalmente, los autores reafirman que, existe una escasa literatura sobre cuestiones metodológicas relacionadas con la enseñanza de la Física Moderna y Contemporánea.

Pese a los resultados del anterior estudio, se considera que este principio del conocimiento previo puede incluirse en una propuesta de enseñanza de la RG en la escuela, teniendo en cuenta que algunos autores demostraron que los estudiantes traen consigo algunas ideas previas sobre conceptos y aplicaciones asociados a la RG, como los agujeros negros, deformación del espacio tiempo, ondas gravitacionales (Postiglione & De Angelis, 2021a), bien sea porque los vieron en noticias científicas que circulan en los medios de comunicación (Almeida & Soltau, 2022, García-Carmona, 2020), las redes sociales o las películas de ciencia ficción (Da Rosa et al., 2017; Rodrigues & Bueno, 2022).

En cuanto, a los principios epistemológicos que poco se abordaron en los estudios, se analiza su inclusión en la enseñanza y aprendizaje de la RG. El principio del desaprendizaje puede tomar un papel relevante para un aprendizaje de la RG. En primer lugar, porque se piensa que esta teoría solo abarca objetos que están en otras partes del universo, como los agujeros negros, o que solamente se puede aprender en niveles universitarios. Una manera de que los estudiantes desaprenden esas ideas es enseñando que, dicha teoría, describe fenómenos que incluso hacen parte de nuestra vida cotidiana, como la caída libre de una hoja (Gould, 2016) o que, de sus conceptos, se han derivado desarrollos tecnológicos que tienen una importancia en la sociedad, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés). En segundo lugar, los estudiantes traen de grados anteriores de escolaridad, posiblemente, nociones de espacio y tiempos absolutos e independientes desde una perspectiva newtoniana, incluso, entienden la gravedad como una fuerza que actúa de manera instantánea; sin embargo, estudiar el universo y sus interacciones desde la física de Einstein, le permitiría al estudiante comprender la relación que existe entre espacio, tiempo y gravedad, además de conocer la diversidad de descubrimientos astrofísicos actuales que están impactando el desarrollo científico y tecnológico. Desaprender la teoría de la gravedad de Newton es importante para comprender fenómenos como la dilatación gravitacional del tiempo o las lentes gravitacionales.

Por otro lado, el principio de la incertidumbre del conocimiento se puede evidenciar de una manera más clara, sobre todo cuando se analizan los conceptos de espacio, tiempo y movimiento desde la mecánica clásica y la física relativista moderna. A diferencia de la teoría newtoniana, la teoría de la relatividad formulada por Einstein muestra que las mediciones del espacio y del tiempo se ven afectadas por el movimiento; es decir, que no son propiedades absolutas, dependen del movimiento relativo y forman una sola entidad llamada espacio-tiempo (Einstein, 1905). Esto por supuesto, marca una gran diferencia entre ambas teorías y muestra la naturaleza cambiante del conocimiento científico, permitiendo que el estudiante reflexione y asuma una posición crítica frente a lo que aprende en el aula. Este principio de la incertidumbre del conocimiento también se puede tener en cuenta cuando se aborda el concepto de gravedad, pues pasa de concebirse como una fuerza a entenderse como una consecuencia de la deformación del espacio-tiempo. Hacer consciente al estudiante de que las teorías pueden cambiar con el tiempo y que dependen del contexto histórico favorece un aprendizaje significativo y crítico.

Lo expuesto anteriormente, muestra que la RG presenta una nueva forma de comprender el universo y esto trae consigo la reconceptualización de algunas ideas vinculadas a la física clásica, lo cual es importante tenerlo en cuenta en la actualización de los contenidos curriculares de la educación básica y media, tanto para que el estudiante comprenda algunos de los nuevos avances científicos y tecnológicos que se están viviendo en la actualidad como para que tenga la posibilidad de reflexionar sobre la naturaleza cambiante del conocimiento científico y con esto aborde aspectos epistemológicos, incluso sociológicos (Cayul, Arriasecq, Greca, & Givonetti, 2019). De esta manera se estaría contribuyendo al desarrollo de aprendizajes significativos y críticos en los estudiantes de estos niveles educativos.

CONCLUSIONES

La educación científica del siglo XXI debe caracterizarse por formar personas con un pensamiento crítico, que les permita afrontar una sociedad contemporánea, cambiante y vertiginosa (Damasio & Peduzzi, 2018). Frente a esto, surgen enfoques como la Teoría del Aprendizaje Significativo Crítico (TASC) propuesta por Moreira (2005), que fomenta las reflexiones en el aula, logrando de esta manera, no solo aprendizajes significativos sino también, contribuyendo a que el estudiante afronte los desafíos de su vida cotidiana de una

manera reflexiva y crítica. Se identificaron 23 estudios que incorporaron esta teoría y sus principios facilitadores en secuencias o propuestas didácticas para el aprendizaje de conceptos de ciencias, en general. Los principios que sobresalen en los estudios son: el principio del conocimiento previo, de la no utilización de la pizarra, de la interacción social y el cuestionamiento, y en poca medida, el del aprendizaje por error y el de incertidumbre del conocimiento.

Si bien Moreira (2005) plantea 11 principios facilitadores para favorecer un aprendizaje significativo y crítico, la mayoría de las propuestas se enmarcaron en la opción de seleccionar algunos de ellos para su incorporación en las secuencias o propuestas didácticas, arrojando resultados significativos. Aunque no se logra identificar en los estudios, de manera justificada, porqué se eligen algunos de los principios y otros no; esto deja el interrogante si el contenido específico del área de conocimiento o el nivel educativo juegan un papel importante en esta selección de los principios de la TASC.

A pesar de que son escasos los estudios que tienen como marco teórico la RG, y en general su presencia en los currículos en la educación básica y media, su enseñanza y aprendizaje es fundamental para comprender algunos de los nuevos descubrimientos de la actualidad. Pero para lograr en los estudiantes una alfabetización en CyT de la RG, es insuficiente enseñar sus conceptos, principios y aplicaciones; es importante la inclusión de aspectos asociados a la NdC ya que permitirían valorar la importancia de las reflexiones epistemológicas en el aprendizaje del conocimiento científico, motivándolos a comprender cómo se construyen las teorías, a resaltar el papel del error en la ciencia y entender su naturaleza cambiante. Este asunto es importante porque la NdC todavía sigue siendo un enfoque desafiante para los profesores de ciencia, por la falta de claridad en su significado y la forma como se debe enseñar (Carreño & Tuay, 2020). Además, su inclusión todavía se encuentra lejos de las aulas de clase en la educación secundaria. Una manera de llevar estas reflexiones al aula es a partir de los principios de la TASC ya que permite que el estudiante vaya más allá del aprendizaje de los contenidos específicos de un área, en este caso de la RG.

Por lo tanto, por el contexto histórico en que surgió la RG y lo revolucionario de las ideas expuestas en ella, se propone la posibilidad de incluir los principios de la TASC para su enseñanza en la educación básica y media, principalmente los principios epistemológicos, ya que estos permitirían relacionar el aprendizaje de la RG con el contexto social, científico y tecnológico que está viviendo el estudiante, contribuyendo de esta manera a despertar en los jóvenes el interés por el aprendizaje de las ciencias, condición fundamental para un aprendizaje significativo y para una formación más crítica.

Finalmente, se debe tener en cuenta que esta revisión sistemática tiene algunas limitaciones; entre ellas es importante mencionar, la exclusión para el análisis de algunos trabajos que proponían abordar los principios de la TASC en maestros en formación y estudiantes universitarios, dado que esta población es ajena al interés de este estudio, y solo se consideraron artículos de investigación, dejando de un lado capítulos de libros, actas de congreso, trabajos de grado y tesis; fuentes de información que pudieran dar lugar a un panorama más amplio sobre cómo se han implementado los principios de la TASC en la educación básica y media.

REFERENCIAS

- Adams, K., Dattatri, R., Kaur, T., & Blair, D. (2021). Long-term impact of a primary school intervention on aspects of Einsteinian physics. *Physics Education*, 56(5), 055031. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac12a9>
- Ahmad Nurkholis Majid, A.N., & Rohaeti, E. (2018). The Effect of Context-Based Chemistry Learning on Student Achievement and Attitude. *American Journal of Educational Research*, 6(6), 836-839. <https://doi.org/10.12691/education-6-6-37>
- Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azulay, R., Baczko, A-K., Ball, D., ... , & Zhang, S.(019). First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring. *Astrophysical Journal Letters*, 875(1). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0f43>
- Almeida, J. R., & Soltau, S. B. (2022). Interstellar movie and Flipped Classroom: a proposal for teach general relativity and black holes in High School. *Research, Society and Development*, 11(5). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>
- Andersen, W.L. (2020). Labs to Accompany Treatment of General Relativity in a General Education Astronomy Course. *The Physics Teacher*, 58(8), 560–563. <https://doi.org/10.1119/10.0002377>

- Ausubel, D., Novak, J. D., & Hanesian, H. (1983). *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. (2a. ed.). México, México: Trillas.
- Avsar, E. B., & Akerson, V.L. (2022). Using Children's Literature in the Middle School Science Class to Teach Nature of Science. *Science & Education*, 31, 713–737. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00274-3>
- Batista, K. A., & Caldas, R. L. (2023). Ensino de Eletromagnetismo: uma proposta didática baseada na modalidade de Rotação por Estações no Ensino Médio. *Revista Thema, Pelotas*, 22(1), 316–327. <https://doi.org/10.15536/thema.V22.2023.316-327.3002>
- Beltrán, J., & Marín, M. (2017). La historieta como material didáctico en la formación de actitudes relacionadas con la Ciencia desde el abordaje de asuntos sociocientíficos. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, Extra, 4715-4720. Recuperado de <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/337663>
- Betancur, L. M., Pulgarín, M. A., & Velásquez, M. F. (2019). Uso de Sistemas de Adquisición de Datos para el Aprendizaje del Concepto de Color. *Revista Científica*, 140–159. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/14485>
- Betetti, E. G., Damasio, F., & Rodrigues, A. (2014). Física moderna e contemporânea no ensino fundamental articulada com conceitos de física clássica por meio de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS). *Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review*, 4(1), 29-40. Recuperado de http://www.if.ufrgs.br/asr/artigos/Artigo_ID48/v4_n1_a2014.pdf
- Boyle, J. (2019). Teaching gravitational waves in the lower secondary school. Part I. A teaching module. *Physics Education*, 54(2), 025005. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/aaf779>
- Caballero S. C. (2008). La progresividad del aprendizaje significativo de conceptos. En M. L. Rodríguez Palmero(Org.): *La Teoría del Aprendizaje Significativo en la perspectiva de la Psicología*. (pp.162-197) *Cognitiva*. Barcelona: España:Octaedro..
- Cândido, A .P., Meneses, J. A., & Greca, I. M. (2020). Análise das Habilidades e Atitudes na Aprendizagem Significativa Crítica de Fenômenos Físicos no Contexto das Séries Iniciais. *Ciência & Educação(Bauru)*, 26, e20009. <https://doi.org/10.1590/1516-731320200009>
- Cândido, A. P., Meneses, J. A., Greca, I. M., & Rizzatti, I. (2023). Conhecimentos prévios sobre calor e temperatura a luz da Aprendizagem Significativa Crítica no contexto dos anos iniciais. *Reamec - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática*, 11(1), e23025. <https://doi.org/10.26571/reamec.v11i1.14522>
- Carreño, A. J., & Tuay, R. N. (2020). La naturaleza de la Ciencia que se enseña desde la práctica reflexiva de los profesores de Ciencia. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, 11(7), 37–63. <https://doi.org/10.26843/10.26843/rencima.v11i7.2789>
- Cayul, E., Arriasecq, I., Greca, I. M., & Givonetti, A. (2019). Análisis de la primera implementación de la propuesta didáctica “Ondas gravitacionales en contexto para la escuela secundaria: física contemporánea, divulgación científica y género”. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31, 181–188. Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/26544>
- Chirone, A. R., Moreira, M. A., & Sahelices, C. C. (2021a). Aprendizagem significativa crítica de equações do 2º grau no ensino remoto de uma escola federal brasileira. *Revista de ensino de Ciências e Matemática*, 12(6), 1–17. <https://doi.org/10.26843/rencima.v12n6a02>
- Chirone, A. R., Moreira, M. A., & Sahelices, C.C. (2021b). Aprendizagem significativa crítica no ensino dos números e seus conjuntos *Revista DDynamis*, 27(2), 03-19.
- Choudhary, R., Foppoli, A., Kaur, T., Blair, D., Zadnik, M., Zadnik, M., & Meagher, R. (2018). Can a short intervention focused on gravitational waves and quantum physics improves students' understanding and attitude? *Physics Education*, 53(6), 065020. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aae26a>
- Choudhary, R., Kraus, U., Kersting, M., Blair, D., Zahn, C., Zadnik, M., & Meagher, R. (2019). Einsteinian physics in the classroom: integrating physical and digital learning resources in the context of an

international research collaboration. *The Physics Educator*, 1(4), 1950016.
<https://doi.org/10.1142/s2661339519500161>

- Choudhary, R., Foppoli, A., Kaur, T., Blair, D., Burman, R., & Zadnik, M. (2020). A comparison of short and long Einsteinian physics intervention programmes in middle school. *Research in Science Education*, 52,305-324 <https://doi.org/10.1007/s11165-020-09944-8>
- Cobo, C., Abril, A. M., & Ariza, M. R. (2019). Propuesta didáctica en la formación de profesorado para trabajar naturaleza de la ciencia y pensamiento crítico. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 3(1), 15-28. <https://doi.org/10.17979/arec.2019.3.1.4630>
- Da Cruz, C. B., Santos, A. R., Rocco, D., Villar, M., & Dos Santos, P. (2021). Aprendizagem significativa crítica no ensino de química: contribuições de uma sequência didática numa abordagem CTSA no desenvolvimento de percepções sobre drogas inalantes. *Experiências em Ensino de Ciências*, 16(2), 96-125.
- Damasio, F., & Peduzzi, L. O. Q. (2018). Para que ensinar ciência no século xxi? - reflexões a partir da filosofia de feyerabend e do ensino subversivo para uma aprendizagem significativa crítica. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, 20, e2851. <https://doi.org/10.1590/1983-21172018200114>
- Da Rosa, C., Giacomelli, A., Da Rosa, A., & Biazus, M. (2017). Relatividade no ensino médio: Análise de uma proposta didática envolvendo o uso de filmes de ficção científica. *Espacios*,38(35), 22-34. Recuperado de <http://www.revistaespacios.com/a17v38n35/17383522.html>
- De Almeida, A., Melo, W., & De Freitas, A. (2023). Uma Proposta para o Ensino de Calorimetria Utilizando a Plataforma Arduino em uma Sequência Didática Diversificada. *Revista do Professor de Física*, 7(1), 20-38. <https://doi.org/10.26512/rpf.v7i1.44793>
- De la Cruz, V. (30 de marzo de 2022). ¡Récord histórico para la humanidad! El Hubble detectó la estrella más lejana jamás vista. *El Colombiano*. Recuperado de <https://bit.ly/3oG7yK4>
- Dos Santos, A. D., Porto, C., & Matos, L. (2022). Uma proposta de introdução à física moderna no ensino médio por meio do fenômeno de tunelamento quântico. *Experiências em Ensino de Ciências*, 17(3), 63-95. Recuperado de <https://fisica.ufmt.br/eenciojs/index.php/eenci/article/view/1104>
- Dua, Y., Blair, D., Kaur, T., & Choudhary, R. (2020). ¿Can Einstein's theory of general relativity be taught to indonesian high school students? *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(1), 50-58.
<https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.22468>
- Einstein, A. (1905). Zur elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*,17, 891–921.
<https://doi.org/10.1002/andp.2005517S113>
- Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–880. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>
- Ferreira, M., Lessa, R., Da Silva, O., Paulucci, L., & Ferreira, F. (2021). Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43, e20210157. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0157>
- Ferreira, G., dos Santos, M., & Alvarenga, K. (2018). Modelagem matemática em atividades sobre a temática do lixo: relações com a Aprendizagem Significativa Crítica. *Experiências em Ensino de Ciências*, 13(1), 70-83. Recuperado de https://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID458/v13_n1_a2018.pdf
- Flores, E., & Silva, L. (2019). A Aprendizagem Significativa de conjunto de números racionais com auxílio de um jogo computacional. *Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review*, 9(2), 59-81.
- Foppoli, A., Choudhary, R., Blair, D., Kaur, T., Moschilla, J., & Zadnik, M. (2019). Public and teacher response to Einsteinian physics in schools. *Physics Education*, 51(1), 015001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/aae4a4>
- Galeano, M. J. (2022). Videojuegos en la plataforma Erudito: una alternativa para ejecutar planes de mejoramiento. *Bio-grafía*, 15(29), 129-142. <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol.15.num29-17706>

- Galeano, M. J. (2023). Aprendizaje significativo de las interacciones ecológicas de la Institución Educativa Barrio Santa Margarita (IEBSM). *Bio-grafia*, 16(30), 140-153. <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol.16.num30-17826>
- García-Carmona, A. (2015). Noticias sobre temas de Astronomía en los diarios: un recurso para aprender sobre la naturaleza de la ciencia reflexivamente. *Revista de Enseñanza de la Física*, 27(1), 19-30. Recuperado de www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/
- García-Carmona, A. (2020). La primera imagen de un agujero negro en los medios: una oportunidad para reflexionar sobre aspectos de naturaleza de la ciencia. *Ciências em Foco*, 13, 1–14. Recuperado de <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/cef/article/view/13857>
- García-Carmona, A. (2021). Learning about the nature of science through the critical and reflective reading of news on the COVID-19 pandemic. *Cultural Studies of Science Education*, 16, 1015–1028. <https://doi.org/10.1007/s11422-021-10092-2>
- Gould, R. R. (2016). Why does a ball fall?: A new visualization for Einstein's model of gravity. *American Journal of Physics*, 84(5), 396–402. <https://doi.org/10.1119/1.4939927>
- Gulis, G., Filho, O. I., Ferreira, M., Carvalho, V., & Martins, M. (2021). Ensino interdisciplinar da fotossíntese: interfaces entre a Aprendizagem Significativa Crítica e as comunidades de investigação. *Experiênciase em Ensino de Ciências*, 16(3), 89-116. Recuperado de <https://fisica.ufmt.br/eencijs/index.php/eenci/article/view/974>
- Hammel, C., Miyahara, R.Y., & Dos Santos, S.A. (2019). O estudo do espectro eletromagnético: o ensino através de uma sequência didática - UEPS Recuperado de *Revista Dynamis*, 25(3), 26-37.
- Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Fragat, T., & Bøe, M. V. (2014). Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: Challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), 678–684. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/49/6/678>
- Kaur, T., Blair, D., Stannard, W., Treagust, D., Venville, G., Zadnik, M., Mathews, W., & Perks, D. (2020). Determining the intelligibility of Einsteinian concepts with middle school students. *Research in Science Education*, 50(6), 2505–2532. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9791-y>
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W., & Zadnik, M. (2017a). Teaching Einsteinian physics at schools: part 1, models and analogies for relativity. *Physics Education*, 52(6), 065012. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa83e4>
- Kaur, T., Blair, D., Moschilla, J., Stannard, W., & Zadnik, M. (2017b). Teaching Einsteinian physics at schools: part 3, review of research outcomes. *Physics Education*, 52(6), 065014. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa83dd>
- Kaur, T., Kersting, M., Blair, D., Adams, K., Treagust, D., Santoso, J., Popkova, A., Boubllil, S., Zadnik, M., Ju, L., Wood, D., Horne, E., & McGoran, D. (2023). Developing and implementing an Einsteinian science curriculum from Years 3 to 10: Part A Concepts, rationale and learning outcomes. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.17342>
- Kaur, T., Blair, D., Stannard, W., Treagust, D., Venville, G., Zadnik, M., Mathews, W., & Perks, D. (2020). Determining the intelligibility of Einsteinian concepts with middle school students. *Research in Science Education*, 50(6), 2505–2532. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9791-y>
- Kraus, U. & Zahn, C. (2019). Sector models—a toolkit for teaching general relativity: III. Spacetime geodesics. *European Journal of Physics*, 40(1), 015602. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aae3b5>
- Kersting, M., Schrock, S., & Papantoniou, S. (2021). 'I loved exploring a new dimension of reality' – a case study of middle-school girls encountering Einsteinian physics in the classroom. *International Journal of Science Education*, 43(12), 2044–2064. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1950943>
- Kersting, M., & Steier, R. (2018). Understanding Curved Spacetime. *Science & Education*, 27, 593–623. <https://doi.org/10.1007/s11191-018-9997-4>.
- Kersting, M., Henriksen, E., Vetleseter, M., & Angell, C. (2018). General relativity in upper secondary school: Design and evaluation of an online learning environment using the model of educational reconstruction.

Physical Review Physics Education Research, 14(1), 010130.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010130>

- Lamar, K. L., & Bolívar, M. T. (2019). Concepciones iniciales sobre la Primera Ley de la Termodinámica a través de la implementación de un proyecto. *RECIE. Revista Electrónica Científica De Investigación Educativa*, 4(2), 971-982. <https://doi.org/10.33010/recie.v4i2.339>
- Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present, and future. En S. K. Abell y N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education*, 1, 831–879. Lawrence Erlbaum Publishers.
- Lederman, N. G., & Lederman, J. S. (2014). Is Nature of Science Going, Going, Going, Gone? *Journal of Science Teacher Education*, 25(3), 235-238. <https://doi.org/10.1007/s10972-014-9386-z>
- Levrini, O. (2014). The role of history and philosophy in research on teaching and learning of relativity. In M. R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 157– 181). Springer.
- López, S. (2014). El aprendizaje significativo crítico. *Cuadernos de pedagogía*, (448), 58-59. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/373079>
- Marín, G. (2021). Algunas concepciones CTSA de estudiantes de noveno grado sobre conceptos termodinámicos. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (49), 239–254. <https://doi.org/10.17227/ted.num49-8645>
- Martinez, D. P. (2019). Understanding the concept of energy from critical meaningful learning in elementary school students. *REDHECS*, 27(14), 204-225.
- Maturana, H. (2001). *Cognição, ciência e vida cotidiana*. Belo Horizonte: Ufmg.
- McComas, W. F., & Clough, M. P. (2020). Nature of science in science instruction: Meaning, advocacy, rationales, and recommendations. In W. F. McComas (Ed.), *Nature of science in science instruction* (pp. 3–22). Springer, Cham.
- Moreira, M. A. (2012). La teoría del aprendizaje significativo crítico: un referente para organizar la enseñanza contemporánea. *UNION. Revista Iberoamericana de Educación Matemática* 31, 9-20. Recuperado de <http://funes.uniandes.edu.co/15845/>
- Moreira, M. A. (2005). Aprendizaje significativo crítico (Critical Meaningful Learning). *Indivisa. Boletín de estudios e investigación* (6), 83–102. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/771/77100606.pdf>
- Moreira, M. A. (2010). Aprendizaje significativo crítico. Versión revisada y extendida de la conferencia dictada en el III Encuentro internacional sobre aprendizaje significativo. Recuperado de https://comenio.wordpress.com/wp-content/uploads/2007/09/aprendizaje_critico.pdf
- Moreira, M.A. (2011). Unidades de Enseñanza Potencialmente Significativas – UEPS. *Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review*, 2(0), 43-63. Recuperado de <https://bit.ly/2Pi2R6h>
- Moreira, M. A. (2014). Enseñanza de la física: aprendizaje significativo, aprendizaje mecánico y criticidad. *Revista de Enseñanza de la Física*, 26(1), 45-52 <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v26.n1.9515>
- Moreira, M. A. (2021a) Predisposición para un aprendizaje significativo de la física: intencionalidad, motivación, interés, autoeficacia, autorregulación y aprendizaje personalizado. *Revista de Enseñanza de la Física*, 33(1), 141-146. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v33.n1.33232>
- Moreira, M. A. (2021b). Desafíos actuales para la enseñanza de las ciencias. *Avances En La Enseñanza De La Física*, 3(1), eAEF.3.1.1. <https://doi.org/10.36411/AEF.3.1.1>
- Müller, I., & Damasio, F. (2020). Homem de ferro como organizador sequencial em uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa acerca de física nuclear e de partículas. *Aprendizagem significativa em revista/meaningful learning review*, 11(1), 21-35.
- Nóbrega, A., Ferst, E. M., & Cândido, A. P. (2023). Análise dos conhecimentos prévios acerca da ideia de resíduos sólidos na perspectiva da Aprendizagem Significativa Crítica no contexto dos anos

iniciais. *REAMEC - Rede Amazônica de Educação em Ciências e Matemática*, 11(1), e23024. <https://doi.org/10.26571/reamec.v11i1.14521>

- Novak, J. D., & Gowin, D.B. (1984). *Learning how to learn*. New York, United States of America: Cambridge University Press.
- OECD (2019). PISA 2018 Science Framework. In PISA 2018 Assessment and Analytical Framework, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/f30da688-en>
- Ortega, V., & Gil, C. (2019). La naturaleza de la ciencia y la tecnología. Una experiencia para desarrollar el pensamiento crítico. *Revista Científica*, 35(2), 167–182. <https://doi.org/10.14483/23448350.14095>
- Pacheco, T., & Damasio, F. (2014). Aprendizagem significativa crítica para introduzir conceitos físicos nos anos iniciais do ensino fundamental. *Aprendizagem significativa em revista/meaningful learning review*, 4(1), 41-57.
- Page, M. J., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Palandi, J., Calheiro, L., & Del Pino, J. C. (2019). Princípios da aprendizagem significativa crítica na construção de uma unidade de ensino potencialmente significativa de radiação implementada no Ensino Médio. *Revista de Enseñanza de la Física*, 31, 579–587. Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/26626>
- Park, W., Yang, S., & Song, J. (2019). When Modern Physics Meets Nature of Science. *Science & Education*, 28(9), 1055-1083. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00075-9>
- Pitts, M., Venville, G., Blair, D., & Zadnik, M. (2014). An exploratory study to investigate the impact of an Enrichment Program on aspects of Einsteinian physics on year 6 students. *Research in Science Education*, 44(3), 363–388. <https://doi.org/10.1007/s11165-013-9386-6>
- Postiglione, A., & De Angelis, I. (2021a). Experience gravity in the classroom using the rubber sheet: an educational proposal from the collaboration between University and School. *Physics Education*, 56(2), 025019. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abcab4>
- Postiglione, A., & De Angelis, I. (2021b). Students' understanding of gravity using the rubber sheet analogy: an Italian experience. *Physics Education*, 56(2), 025020. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abd1c4>
- Postman, N., & Weingartner, C. (1969). *Teaching as a subversive activity*. Dell Publishing Company.
- Rodrigues, J., & Bueno, S. (2022). Filme Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio. *Research, Society and Development*, 11(5), e40911528437. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>
- Rodríguez, M. (2011). La teoría del aprendizaje significativo: una revisión aplicable a la escuela actual. IN. *Revista Electrónica de Investigación e Innovación Educativa y Socioeducativa*, 3(1), 29-50. Recuperado de http://www.in.uib.cat/pags/volumenes/vol3_num1/rodriguez/index.html
- Ruggiero, M., Mattiello, S. & Leone, M. (2021). Physics for the masses: teaching Einsteinian gravity in primary school. *Physics Education*, 56(6), 065011. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac1ca3>
- Ryston, M. (2019). Embedding Diagrams - a Hands-on Activity for Understanding Spatial Curvature. *Journal of Physics: Conference Series*, 1287, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1287/1/012008>
- Santana, C. M. L., Rodrigues, B., Aquino, F., França, E., & Aquino, K. (2021). TAPEQUIM: Uma Tabela Periódica que Contribui para o Ensino de Radioisótopos Naturais na Perspectiva de uma Aprendizagem Significativa Crítica. *Revista Debates em Ensino de Química*, 7(3), 74–88. Recuperado de <https://www.journals.ufpe.br/index.php/REDEQUIM/article/view/3882>

- Vázquez, A., & Manassero-Mas, M. (2012). La selección de contenidos para enseñar naturaleza de la ciencia y tecnología (parte 1): Una revisión de las aportaciones de la investigación didáctica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 9(1),2-31. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92024530002>
- Wood, M., Smith, W. & Jackson, M. (2016). Curvature of spacetime: A simple student activity. *The Physics Teacher*, 54(9), 572–573. <https://doi.org/10.1119/1.4967905>
- Zahn, C., & Kraus, U. (2019). Sector models—a toolkit for teaching general relativity: II. Geodesics. *European Journal of Physics*, 40(1), 015601. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aae3b7>
- Zahn, C. & Kraus, U. (2014). Sector models—A toolkit for teaching general relativity: I. Curved spaces and spacetimes. *European Journal of Physics*, 35(6), 055020. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/5/055020>

Recebido em: 06.10.2023

Aceito em: 18.04.2024