

EDUCAÇÃO MATEMÁTICA COMO LINGUAGEM DE INOVAÇÃO, CRIATIVIDADE E DESIGN NO CONTEXTO STEAM E DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: INTEGRAÇÕES TEÓRICAS COM TPACK-AI E ANALÍTICA DE APRENDIZAGEM*MATHEMATICS EDUCATION AS A LANGUAGE OF INNOVATION, CREATIVITY, AND DESIGN IN THE STEAM AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE CONTEXT: THEORETICAL INTEGRATIONS WITH TPACK-AI AND LEARNING ANALYTICS**LA EDUCACIÓN MATEMÁTICA COMO LENGUAJE DE INNOVACIÓN, CREATIVIDAD Y DISEÑO EN EL CONTEXTO STEAM Y DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: INTEGRACIONES TEÓRICAS CON TPACK-AI Y ANALÍTICA DEL APRENDIZAJE*

ALEXANDRE EMANUEL BATISTA TROCADO¹
CELINA APARECIDA ALMEIDA PEREIRA ABAR²
JOSÉ MANUEL DOS SANTOS DOS SANTOS³
ZSOLT LAVICZA⁴

RESUMO

Este artigo investiga como articular referenciais da Didática da Matemática com frameworks contemporâneos de Inteligência Artificial (IA) e TPACK-AI para fundamentar o desenho de tarefas STEAM e orientar a formação docente - lacuna identificada na literatura recente. A partir de uma revisão narrativa integradora de natureza teórico-analítica, discutem-se integrações entre Educação Matemática, abordagem STEAM e ecossistemas de aprendizagem mediados por IA, com foco em literacia em IA, criatividade e quadros de conhecimento docente (TPACK-AI, AI-TPACK, Intelligent-TPACK) desenvolvidos entre 2023 e 2025. A análise combina os quadros de Registros de Representação Semiótica

1 Doutorado em Álgebra Computacional pelo Consórcio Universidade Aberta e Universidade de Coimbra. É licenciado em Matemática, ramo educacional, e Mestre em Ensino da Matemática pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Professor de Matemática no Colégio Camões (Gondomar, Portugal). A investigação que desenvolve age na áreas: topologia de baixas dimensões; utilização de tecnologias, incluindo a Inteligência Artificial, em processos de ensino e aprendizagem da matemática. E-mail: mail@alexandretrocado.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5589-8100>

2 Doutorado em Lógica Matemática e Mestrado em Matemática pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Especialista em Tecnologias Interativas Aplicadas à Educação, em Design Instrucional para Educação On-Line (UFJF) e em Entornos Virtuales de Aprendizaje (OEI). Possui graduação em Licenciatura e Bacharelado em Matemática pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Professora titular da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo atuando na Graduação e no Programa Pós-Graduação em Educação Matemática da PUC-SP. Os projetos de pesquisas em desenvolvimento abordam tecnologias digitais, realidades virtual e aumentada, ensino híbrido, contexto STEM e STEAM, IA. Disciplinas realizadas no curso de especialização Inteligência Artificial na Educação da Universidade Federal de São Carlos. Coordenadora do Instituto GeoGebra de São Paulo e Editora da respectiva revista. E-mail: abarcaap@pucsp.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6685-9956>

3 Doutorado em: Álgebra Computacional pelo Consórcio Universidade Aberta e Universidade de Coimbra; em Educação pela Universidade Johannes Kepler de Linz, Áustria. Pós graduado em: Supervisão Pedagógica e Formação de Formadores pela Faculdade de Psicologia e Ciências da Educação da Universidade do Porto; Administração Escolar pela Escola Superior de Educação do Instituto Politécnico do Porto. É licenciado em Matemática, ramo educacional, e Mestre em Ensino da Matemática pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Matemática da Universidade de Coimbra, atuando na área da formação inicial de professores. A investigação que desenvolve age na áreas: topologia de baixas dimensões; utilização de tecnologias, incluindo a Inteligência Artificial, em processos de ensino e aprendizagem da matemática e na formação inicial e contínua de professores. E-mail: dossantos@uc.pt. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6830-6503>

4 Professor de Educação STEAM e de Métodos de Investigação na Johannes Kepler University Linz (Áustria). Exerce funções de liderança na escola doutoral da universidade, contribuindo para a formação de uma nova geração de investigadores em tecnologias educativas provenientes de diversos contextos internacionais. Com formação inicial em Matemática e Física, realizou a transição de uma carreira em Matemática Aplicada para a área da Educação Matemática, tendo obtido o grau de doutor (PhD) na Universidade do Michigan. Ao longo de mais de uma década na University of Cambridge, participou ativamente no desenvolvimento e na expansão do GeoGebra, uma das plataformas educativas mais utilizadas a nível mundial, com mais de 100 milhões de utilizadores. Atualmente, coordena investigação e projetos internacionais centrados na formação de professores, na integração STEAM e no uso ético e criativo de ferramentas de inteligência artificial em contextos educativos. E-mail: zsolt.lavicza@jku.at. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3701-5068>

(Duval, 2006) e Gênese Instrumental (Rabardel, 1995) com propostas recentes de literacia em IA e estudos empíricos sobre TPACK, autoeficácia e disposição docente para adoção de IA. São formulados seis princípios orientadores para o desenho de tarefas STEAM em Educação Matemática e discutem-se implicações para a formação inicial e continuada de professores. Conclui-se que a articulação entre TPACK-AI, Registros Semióticos, Gênese Instrumental e literacia em IA oferece um quadro teórico consistente para orientar o desenho de tarefas que posicionam a Matemática como linguagem de modelagem, análise e design em ecossistemas STEAM, sendo necessário avançar em investigações empíricas que examinem os efeitos dessas propostas sobre práticas de sala de aula e aprendizagem dos estudantes.

Palavras-chave: Educação Matemática; STEAM; Inteligência Artificial; TPACK-AI; Registros Semióticos.

ABSTRACT

This article investigates how to articulate Mathematics Didactics frameworks with contemporary Artificial Intelligence (AI) and TPACK-AI models to support the design of STEAM tasks and guide teacher education - a gap identified in recent literature. Drawing on an integrative narrative review of a theoretical-analytical nature, integrations between Mathematics Education, the STEAM approach, and AI-mediated learning ecosystems are discussed, focusing on AI literacy, creativity, and teacher knowledge frameworks (TPACK-AI, AI-TPACK, Intelligent-TPACK) developed between 2023 and 2025. The analysis combines the Semiotic Registers of Representation (Duval, 2006) and Instrumental Genesis (Rabardel, 1995) frameworks with recent AI literacy proposals and empirical studies on TPACK, self-efficacy, and teachers' willingness to adopt AI. Six guiding principles for designing STEAM tasks in Mathematics Education are formulated, and implications for initial and continuing teacher education are discussed. It is concluded that the articulation between TPACK-AI, Semiotic Registers, Instrumental Genesis, and AI literacy offers a consistent theoretical framework for guiding task design that positions Mathematics as a language of modelling, analysis, and design in STEAM ecosystems, with further empirical research needed to examine the effects of these proposals on classroom practices and student learning.

Keywords: Mathematics Education; STEAM; Artificial Intelligence; TPACK-AI; Semiotic Registers.

RESUMEN

Este artículo investiga cómo articular referentes de la Didáctica de la Matemática con marcos contemporáneos de Inteligencia Artificial (IA) y TPACK-AI para fundamentar el diseño de tareas STEAM y orientar la formación docente - laguna identificada en la literatura reciente. A partir de una revisión narrativa integradora de naturaleza teórico-analítica, se discuten integraciones entre la Educación Matemática, el enfoque STEAM y los ecosistemas de aprendizaje mediados por IA, con enfoque en la alfabetización en IA, la creatividad y los marcos de conocimiento docente (TPACK-AI, AI-TPACK, Intelligent-TPACK) desarrollados entre 2023 y 2025. El análisis combina los marcos de Registros de Representación Semiótica (Duval, 2006) y Génesis Instrumental (Rabardel, 1995) con propuestas recientes de alfabetización en IA y estudios empíricos sobre TPACK, autoeficacia y disposición docente para la adopción de la IA. Se formulan seis principios orientadores para el diseño de tareas STEAM en Educación Matemática y se discuten implicaciones para la formación inicial y continua de profesores. Se concluye que la articulación entre TPACK-AI, Registros Semióticos, Génesis Instrumental y alfabetización en IA ofrece un marco teórico consistente para orientar el diseño de tareas que posicionan la Matemática como lenguaje de modelización, análisis y diseño en ecosistemas STEAM, siendo necesario avanzar en investigaciones empíricas que examinen los efectos de estas propuestas sobre las prácticas de aula y el aprendizaje de los estudiantes.

Palabras-clave: Educación Matemática; STEAM; Inteligencia Artificial; TPACK-AI; Registros Semióticos.

INTRODUÇÃO

A abordagem STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics) tem sido discutida como evolução das propostas STEM, integrando dimensões artísticas e criativas na construção de conhecimentos científicos e matemáticos (Quigley; Herro, 2017; Sousa; Pinho, 2022; Yakman, 2008). Nessa perspectiva, a Matemática é entendida como linguagem para modelar fenômenos, estruturar problemas complexos e apoiar processos de design em contextos interdisciplinares. Essa concepção dialoga com a tradição da Didática da Matemática, que atribui centralidade aos registros de representação e às mediações instrumentais no desenvolvimento do pensamento matemático (Drijvers, 2019; Duval, 2006; Rabardel, 1995).

Nos últimos anos, o crescimento de aplicações de IA generativa e de modelos de linguagem de grande porte (LLM) em educação reconfigura possibilidades de tarefas STEAM, permitindo automatização de processos de simulação, geração de dados e produção de representações multimodais. Revisões recentes indicam que a IA em educação abrange desde tutores inteligentes e sistemas de apoio à decisão até sistemas generativos usados na elaboração de conteúdos, avaliação formativa e apoio ao raciocínio criativo (Chiu *et al.*, 2023). Em Educação Matemática, estudos bibliométricos evidenciam aumento de publicações sobre IA em tópicos como resolução de problemas, avaliação automática, reformulação de tarefas abertas e apoio à prova e à argumentação (Hosseini-Mohand *et al.*, 2025; Walkington, 2025).

Paralelamente, a literatura sobre conhecimento profissional docente tem expandido o modelo TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) (Mishra; Koehler, 2006; Shulman, 1986) para abarcar especificidades da IA. Análises recentes reúnem propostas sob designações como AI-TPACK, TPACK-AI e Intelligent-TPACK, enfatizando que a integração pedagógica de IA exige articulação entre conhecimentos tecnológicos, pedagógicos, de conteúdo e de IA, bem como literacia crítica sobre implicações éticas e sociotécnicas (Al-Abdullatif, 2024; Chiu, 2025b; Ning *et al.*, 2024; Paidicán Soto; Arredondo Herrera, 2024).

Estudos empíricos publicados entre 2024 e 2025 sugerem que TPACK e suas extensões relacionadas à IA se articulam de modo estreito com autoeficácia docente, satisfação de necessidades psicológicas básicas e disposição para integrar IA generativa em contextos de ensino (Ismaniaty *et al.*, 2025; Xia *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025). Em termos teóricos, essas contribuições dialogam com abordagens baseadas na teoria da autodeterminação (Self-Determination Theory, SDT) para planejamento curricular em IA (Chiu; Chai, 2020).

O objetivo deste artigo é integrar referenciais da Didática da Matemática com modelos contemporâneos de IA e TPACK-AI, discutindo implicações para o desenho de tarefas STEAM e para a formação docente. Assim, discute-se como esses desenvolvimentos podem ser articulados com a Educação Matemática no contexto STEAM. Em particular, exploram-se: (a) a relação entre criatividade, IA e tarefas de modelagem matemática; (b) o papel de representações distribuídas e *embeddings*, entendidos como representações vetoriais contínuas de produções dos estudantes, no desenho de sistemas de análise de aprendizagem, incluindo o uso exploratório de algoritmos de *clustering* para agrupar produções por similaridade; (c) as implicações de TPACK-AI, AI-TPACK e Intelligent-TPACK (I-TPACK) para o desenho de tarefas STEAM e para a formação de professores de Matemática.

A questão norteadora pode ser formulada nos seguintes termos: como os referenciais da Didática da Matemática - em particular, a teoria dos Registros de Representação Semiótica (Duval, 2006) e a Gênese Instrumental (Rabardel, 1995) - podem ser articulados com os modelos TPACK-AI,

AI-TPACK e Intelligent-TPACK para fundamentar o desenho de tarefas STEAM e a formação de professores de Matemática em contextos mediados por IA? A formulação dessa questão responde a uma lacuna identificada na literatura: embora existam estudos sobre TPACK-AI e sobre o uso de IA em educação, são escassos os trabalhos que articulam explicitamente esses frameworks com referenciais consolidados da Didática da Matemática para derivar princípios de design didático e orientações formativas (Ning *et al.*, 2024; Paidicán Soto; Arredondo Herrera, 2024).

Cabe esclarecer que, embora o artigo mobilize referenciais de diferentes domínios - autoeficácia docente, teoria da autodeterminação, literacia em IA -, esses constructos são convocados de modo subsidiário, na medida em que contribuem para compreender condições de integração de IA em contextos de Educação Matemática. O eixo central da análise reside na articulação entre Registros de Representação Semiótica, Gênese Instrumental e TPACK-AI para o desenho de tarefas STEAM, sendo os demais referenciais mobilizados como suportes complementares à argumentação principal.

O texto organiza-se em eixos teóricos articulados, culminando na formulação de princípios para o desenho de tarefas e em implicações para a formação docente. Em todos os eixos, discute-se ainda como esses usos podem ampliar ou tensionar a agência dos estudantes, sobretudo no que se refere à autoria e à responsabilidade epistémica nas decisões matemáticas.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como revisão narrativa integradora, de natureza teórico-analítica, orientada pelo problema de como articular referenciais da Didática da Matemática com frameworks contemporâneos de IA e TPACK-AI para sustentar o desenho de tarefas STEAM e discutir implicações para a formação docente. Diferentemente das revisões sistemáticas, privilegia-se aqui a construção de uma síntese interpretativa, capaz de explicitar convergências, tensões e lacunas, e de fundamentar proposições de design didático e de agenda de pesquisa.

A seleção de literatura combinou busca em bases de dados indexadas - Scopus, Web of Science, ERIC e Google Scholar - e rastreamento por citações (backward e forward citation tracking). Os descritores de busca incluíram combinações dos seguintes termos: “TPACK-AI” OR “AI-TPACK” OR “Intelligent-TPACK” OR “I-TPACK”; “artificial intelligence” AND “mathematics education”; “STEAM” AND “artificial intelligence” AND “education”; “learning analytics” AND “embeddings”; “AI literacy” AND “teacher education”; “semiotic registers” AND “digital”; “instrumental genesis” AND “technology”. As buscas privilegiaram publicações do período de 2023 a 2025, sem excluir obras clássicas indispensáveis à fundamentação da análise didática (Duval, 2006; Rabardel, 1995; Drijvers, 2019). Foram incluídos trabalhos revisados por pares que apresentassem contributos conceituais ou evidências empíricas relevantes para a integração de IA no ensino, especialmente em contextos STEM/STEAM e em Educação Matemática. Foram excluídos textos sem enquadramento teórico-metodológico explícito, trabalhos duplicados e publicações em formato de resumo ou editorial. Esse processo resultou na seleção de 25 trabalhos que compõem o corpus analítico do estudo.

O tratamento analítico consistiu em leitura integral dos estudos selecionados e em codificação temática orientada por três eixos articuladores: coordenação de registros semióticos, processos de gênese instrumental e conhecimentos docentes necessários à integração de IA (TPACK-AI e extensões). A partir dessa codificação, elaborou-se uma síntese comparativa para derivar princípios de desenho de tarefas e implicações formativas; os usos de *embeddings* e de *clustering* são discutidos como possibilidades metodológicas para analítica de aprendizagem, enfatizando limites de

interpretabilidade, necessidade de triangulação e cuidados ético-sociotécnicos relacionados a dados, transparência e agência dos estudantes.

EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, CRIATIVIDADE E STEAM NA ERA DA IA STEAM COMO ECOSISTEMA INTEGRADOR

Modelos de educação STEAM enfatizam integração epistemológica entre ciências, tecnologias digitais, engenharia, artes e Matemática, articulando projetos que envolvem investigação, design e produção de artefatos (Quigley; Herro, 2017; Yakman, 2008). Nessa configuração, a Matemática assume papéis simultâneos de linguagem de formalização, ferramenta de análise de dados e recurso expressivo em visualizações, animações e instalações interativas (Sousa; Pinho, 2022).

A literatura internacional recente no campo STEM/STEAM tem examinado impactos de tecnologias emergentes (realidade estendida, robótica, IA) sobre práticas de ensino e sobre o desenvolvimento de interesse, identidade e competências dos estudantes (Chiu; Li, 2023). Em particular, têm sido discutidas as potencialidades de ambientes de investigação digitais, sistemas de simulação e plataformas colaborativas na promoção de processos de criação e co-criação em STEM, incluindo a Matemática, em projetos baseados em problemas e desafios autênticos.

Do ponto de vista da criatividade, estudos mostram que experiências de investigação digital podem favorecer processos criativos quando articuladas com tarefas que requerem exploração, formulação de hipóteses, testes iterativos e reflexão metacognitiva (Weng; Chiu, 2023). A integração de IA generativa intensifica esse cenário, visto que ambientes de co-criação humano-IA permitem explorar múltiplas ideias, representações e abordagens de solução em prazos reduzidos, desde que estruturados com critérios de avaliação crítica e reflexão epistemológica.

EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, CRIATIVIDADE E IA

Em Educação Matemática, análises recentes indicam que a IA é mobilizada em diferentes frentes: geração de itens, feedback automático, detecção de erros, apoio à explicação de soluções, construção de exemplos e contraexemplos, assim como no apoio à visualização e à modelagem (Hosseini-Mohand *et al.*, 2025). Estudos teóricos e empíricos discutem efeitos da IA generativa sobre o ensino exploratório e a resolução de problemas abertos, evidenciando simultaneamente oportunidades de ampliação da exploração, da autorregulação e da produção de múltiplas representações e tensões associadas à delegação de responsabilidade epistêmica, à opacidade de critérios e à diluição de autoria, com implicações diretas para a avaliação (Walkington, 2025). Neste artigo, entende-se agência dos estudantes como a capacidade de tomar decisões matematicamente justificadas, produzir e validar argumentos e assumir autoria das soluções, mesmo quando a IA é mobilizada como recurso de apoio.

Revisões sistemáticas sobre IA em educação, com foco em trabalhos publicados até 2023, reportam que a maior parte das investigações se concentra nos níveis superior e secundário e em disciplinas STEM, com crescimento recente de estudos que combinam IA generativa, análise de dados de aprendizagem e desenho de atividades criativas (Chiu *et al.*, 2023). Esses trabalhos sugerem que a IA tem maior potencial formativo quando usada para sustentar explorações e justificar decisões, e não apenas para automatizar procedimentos ou fornecer respostas prontas.

Para que a IA constitua um recurso efetivo para a criatividade matemática, torna-se necessário enquadrar a sua utilização em tarefas que exijam tomada de decisão fundamentada, comparação de

soluções, interpretação de representações e explicitação de critérios de qualidade. A literatura aponta que a mediação docente é central para transformar sugestões da IA em oportunidades de discussão conceitual e de reflexão sobre a natureza da prova, da generalização e da modelagem.

REPRESENTAÇÕES SEMIÓTICAS, *EMBEDDINGS* E ANALÍTICA DE APRENDIZAGEM REGISTROS SEMIÓTICOS E PENSAMENTO MATEMÁTICO EM AMBIENTES DIGITAIS

A análise cognitiva de Duval (2006) enfatiza que o pensamento matemático depende da coordenação de diferentes registros semióticos (algébrico, gráfico, simbólico, verbal etc.) e de processos de conversão entre registros. Em ambientes digitais, essa coordenação é mediada por ferramentas que ampliam a possibilidade de produzir e manipular representações, o que redefine o papel do professor e do estudante na gestão de registros (Abar; Lavicza, 2019; Drijvers, 2019).

A Gênese Instrumental (Rabardel, 1995) contribui para compreender como artefatos tecnológicos (por exemplo, software de geometria dinâmica, ambientes algébricos computacionais, sistemas baseados em IA) são apropriados como instrumentos de aprendizagem. Esses processos envolvem esquemas de uso, reorganização de tarefas e reconfiguração de técnicas matemáticas, o que implica repensar o desenho de ambientes STEAM e as formas de avaliação.

EMBEDDINGS, IA GENERATIVA E ANALÍTICA DE APRENDIZAGEM

Os desenvolvimentos recentes em processamento de linguagem natural, especialmente modelos de linguagem baseados em transformadores, permitem representar textos, códigos e outros objetos semióticos por meio de *embeddings* em espaços vetoriais. Em educação, diversas investigações têm explorado o uso de *embeddings* para análise de respostas abertas, mapas conceituais e diagramas causais, com o objetivo de automatizar avaliações e identificar padrões em dados complexos. No presente enquadramento, *embeddings* não são tratados como interpretação do significado matemático, mas como codificações estatísticas dependentes do modelo, do corpus e da métrica de similaridade; por essa razão, a sua utilização deve ser triangulada com leitura humana e com critérios didático-epistemológicos ancorados nos Registros Semióticos e na Gênese Instrumental, de modo a preservar validade interpretativa e transparência.

Por exemplo, Rashid *et al.* (2023) utilizaram *embeddings* de sentenças em combinação com algoritmos de *clustering* (métodos não supervisionados de agrupamento por similaridade no espaço vetorial) para identificar concordância e discordância em *feedback* de pares, apontando potencial para apoiar processos de regulação da aprendizagem em ambientes de avaliação formativa. Em aplicações educativas, tais agrupamentos devem ser entendidos como indícios exploratórios e não como diagnósticos, exigindo validação qualitativa e explicitação de parâmetros de análise (por exemplo, métrica, número de grupos e tratamento de ruído). Em um estudo mais recente, Pijeira-Díaz *et al.* (2024) analisaram diagramas causais produzidos por estudantes com técnicas baseadas em Sentence-BERT, mostrando que modelos de *embeddings* podem aproximar a avaliação automática da leitura humana de estruturas causais.

No domínio da formação profissional e da educação ao longo da vida, Lefebvre *et al.* (2024) propuseram um quadro de *embeddings* específico para contextos educacionais, discutindo desafios ligados à preservação de nuances disciplinares e à interpretabilidade das representações. Em paralelo, revisões sobre IA generativa e analítica de aprendizagem evidenciam que modelos generativos têm

sido usados majoritariamente para codificação de discurso, classificação de produções e síntese de informação, com menor incidência de aplicações voltadas à retroalimentação formativa integrada ao ciclo de aprendizagem (Misiejuk *et al.*, 2025).

No contexto da Educação Matemática e STEAM, esses desenvolvimentos indicam a possibilidade de desenhar tarefas que combinem produção textual, simbólica e gráfica com análise automatizada via *embeddings*, permitindo acompanhar processos de modelagem, argumentação e exploração de forma mais fina. Tais usos, entretanto, exigem articulação cuidadosa com pressupostos epistemológicos da Matemática e com questões éticas relativas à privacidade, à transparência algorítmica e à agência dos estudantes.

QUADROS TPACK, AI-TPACK, TPACK-AI E I-TPACK E EXTENSÕES PARA IA

O modelo TPACK (Mishra; Koehler, 2006), ancorado na noção de conhecimento pedagógico do conteúdo (Shulman, 1986), consolidou-se como referência para analisar conhecimentos docentes necessários à integração pedagógica de tecnologias. A sua estrutura, composta por domínios tecnológicos, pedagógicos, de conteúdo e pelas intersecções entre eles, tem sido amplamente mobilizada em estudos sobre integração de recursos digitais.

A emergência de tecnologias de IA motivou extensões do TPACK que incorporam dimensões específicas dessa tecnologia. Ning *et al.* (2024) propuseram o conceito de AI-TPACK, definindo componentes de conhecimento tecnológico em IA, conhecimento pedagógico sobre IA e conhecimento de conteúdo em IA, bem como interações entre esses elementos e o TPACK clássico. Resultados empíricos indicam que componentes de AI-TPACK mantêm relações distintas com percepções de eficácia e com a autopercepção de prontidão para integrar IA em sala de aula.

Revisão sistemática conduzida por Paidicán Soto e Arredondo Herrera (2024) sobre TPACK em contextos de IA conclui que a produção científica ainda é relativamente reduzida, mas aumentou de forma acentuada a partir de 2021. Os autores identificam predominância de estudos com professores universitários, focados em questionários de autorrelato sobre TPACK e TPACK-AI, bem como um número crescente de instrumentos de avaliação adaptados ou desenvolvidos para contextos de IA. Em vários desses estudos, IA é tratada explicitamente como tecnologia emergente que exige conhecimentos técnicos específicos (por exemplo, conceitos básicos de algoritmos, dados e modelos) e conhecimentos pedagógicos sobre usos responsáveis e críticos.

Em paralelo, tem sido desenvolvida a noção de Intelligent-TPACK (I-TPACK), que aprofunda a dimensão tecnológica para abarcar sistemas inteligentes e IA. Al-Abdullatif (2024) modelaram a aceitação de IA generativa no ensino superior integrando literacia em IA, I-TPACK e confiança percebida em modelos de aceitação tecnológica. Os resultados sugerem que I-TPACK mede a proficiência docente em selecionar e usar ferramentas baseadas em IA de forma pedagógica e disciplinarmente adequada.

Chiu (2025b) propôs um enquadramento conceptual de I-TPACK derivado de uma análise de literacia e competência em IA apontando implicações para o desenho de currículos e programas de desenvolvimento profissional. Em contextos de formação de professores, investigações recentes analisam níveis de I-TPACK de futuros docentes e suas percepções de prontidão para integrar ferramentas generativas em disciplinas específicas (Luaran; Al-Abdullatif, 2024). Outros estudos discutem o papel do apoio institucional na constituição de AI-TPACK, sugerindo que políticas de formação contínua e de infraestruturas adequadas são determinantes para que professores desenvolvam conhecimentos tecnológicos, pedagógicos e éticos sobre IA (Alharbi, 2025; Seufert *et al.*, 2024).

TPACK-AI E EDUCAÇÃO MATEMÁTICA NO CONTEXTO STEAM

No âmbito da Educação Matemática, o TPACK-AI pode ser entendido como estrutura que integra: (a) conhecimentos de conteúdo matemático e de IA relevantes para tarefas STEAM; (b) conhecimentos pedagógicos sobre trabalho exploratório, resolução de problemas, modelagem e discussão coletiva; (c) conhecimentos tecnológicos sobre ferramentas de IA, ambientes de simulação, sistemas de geometria dinâmica e/ou álgebra computacional que incorporam componentes de IA. Esses conhecimentos articulam-se com literacia em IA, entendida como conjunto de competências cognitivas, afetivas, éticas e comportamentais para compreender e usar sistemas de IA de modo crítico e responsável (Chiu, 2025a; Ng *et al.*, 2023).

Do ponto de vista do desenho de tarefas STEAM, TPACK-AI orienta o professor de Matemática na seleção de problemas, ferramentas e estratégias de mediação. Por exemplo, tarefas de modelagem podem ser estruturadas combinando recolha de dados com sensores, exploração em ambiente de geometria dinâmica com recursos de IA incorporados, e uso de LLM para gerar conjecturas ou representações alternativas, a partir das quais a turma discute plausibilidade, generalizações e provas.

A integração de TPACK-AI com referenciais da Didática da Matemática sugere a necessidade de explicitar o modo como ferramentas de IA afetam a gestão de registros semióticos e a Gênese Instrumental. Sistemas de IA podem produzir traduções entre registros (por exemplo, de linguagem natural para expressão algébrica) e sugerir técnicas pré-configuradas, o que coloca desafios à compreensão de procedimentos e à construção de significados conceituais. Nessa perspectiva, TPACK-AI não se reduz a acrescentar “mais tecnologia”, mas a repensar as relações entre representações, instrumentos e práticas matemáticas.

AUTOEFICÁCIA, SATISFAÇÃO DE NECESSIDADES E INTEGRAÇÃO DE IA GENERATIVA TPACK, AUTOEFICÁCIA E INTENÇÕES DE USO DE IA

Estudos recentes relacionam TPACK e extensões associadas à IA com autoeficácia docente e intenções de uso de IA em contextos educacionais. Ismaniati *et al.* (2025) analisaram relações entre TPACK, autoeficácia para usar IA e intenção de adotar IA em amostra de professores da educação básica. Os resultados indicam que TPACK exerce efeito indireto sobre a intenção de adoção de IA, mediado pela autoeficácia para uso da tecnologia. Assim, o aumento de TPACK, por si só, não garante intenção de uso; a mediação pela crença de capacidade para selecionar, adaptar e usar IA em contextos de ensino mostra-se crucial.

Em um estudo com uma grande amostra de professores, Yang *et al.* (2025) investigaram o efeito de TPACK sobre a disposição para integrar IA generativa (WIAI), considerando o papel moderador de emoções negativas (ansiedade, desconforto) e o efeito de amortecimento da satisfação de necessidades psicológicas básicas (competência, autonomia, relacionamento). Os autores mostraram que TPACK influencia positivamente a WIAI, mas esse efeito é enfraquecido por emoções negativas; por outro lado, a satisfação de necessidades de competência e relacionamento reduz o impacto dessas emoções, apoiando a integração de IA.

Xia *et al.* (2025) estenderam essa linha de investigação ao examinar a relação entre TPACK, autoeficácia e vontade de integrar IA generativa no ensino superior, propondo um modelo em que a satisfação de necessidades psicológicas básicas medeia as relações entre autoeficácia baseada em TPACK e vontade de integrar IA. O estudo indica que professores com maior autoeficácia em TPACK

sentem maior satisfação de necessidades, o que, por sua vez, associa-se a maior disposição para integrar ferramentas de IA generativa em práticas de ensino.

TPACK-AI, TEORIA DA AUTODETERMINAÇÃO E FORMAÇÃO DOCENTE

As evidências anteriores complementam resultados de pesquisas fundamentadas na teoria da autodeterminação sobre currículo de IA e interesse em STEM. Chiu e Chai (2020) discutem o planejamento sustentável de currículo de IA a partir da SDT, defendendo que a concepção de atividades deve apoiar necessidades de autonomia, competência e relacionamento, para que estudantes desenvolvam literacia em IA sem reduzir-se a treinamentos instrumentais. Posteriormente, Chiu (2024) analisou interesse e identidade em STEM com base na SDT, mostrando que contextos de aprendizagem que apoiam necessidades psicológicas facilitam envolvimento sustentável em projetos STEM.

No campo da literacia em IA, Ng *et al.* (2023) desenvolveram e validaram um questionário que abrange dimensões afetivas, comportamentais, cognitivas e éticas, evidenciando que crenças, atitudes e preocupações éticas interagem com competências técnicas na compreensão de IA. Chiu (2025a) consolidou um quadro abrangente de literacia e competência em IA propondo indicadores para orientar formação de professores e de estudantes.

Ao articular esses resultados com o TPACK-AI, pode-se defender que a formação docente em Educação Matemática deve ir além do domínio técnico de ferramentas de IA e contemplar: (a) fortalecimento da autoeficácia para uso pedagógico de IA; (b) desenho de experiências de formação que apoiem necessidades psicológicas básicas; (c) desenvolvimento de literacia crítica em IA incluindo análise de viés, transparência algorítmica e implicações éticas. A combinação de TPACK-AI, SDT e literacia em IA oferece um quadro coerente para orientar programas de desenvolvimento profissional.

INTEGRAÇÕES COM A DIDÁTICA DA MATEMÁTICA: REGISTROS, MODELAGEM E GÊNESE INSTRUMENTAL REGISTROS SEMIÓTICOS E IA EM TAREFAS MATEMÁTICAS

A teoria dos registros de representação semiótica (Duval, 2006) oferece enquadramento para analisar como a IA pode intervir no trânsito entre registros em tarefas matemáticas. Ferramentas de IA podem: (a) gerar múltiplas representações para o mesmo conceito (por exemplo, gráficos, tabelas, equações, textos explicativos); (b) traduzir expressões entre registros (por exemplo, texto natural para expressão simbólica); (c) apoiar a construção de exemplos e contraexemplos para explorar propriedades.

Essa multiplicidade de representações pode favorecer a compreensão, mas também introduz riscos de superficialidade se os estudantes se limitarem a aceitar respostas da IA sem análise. Do ponto de vista da Didática da Matemática, torna-se necessário conceber tarefas que exijam explicação de razões para escolher determinadas representações, comparação de soluções produzidas por humanos e pela IA, e discussão sobre a validade de inferências. Nessa perspectiva, o professor de Matemática, apoiado por TPACK-AI, atua como mediador que organiza o trabalho com registros de modo a promover conversões compreensivas e não apenas traduções automáticas.

GÊNESE INSTRUMENTAL, IA E DESIGN DE TAREFAS

A Gênese Instrumental (Rabardel, 1995) permite analisar como artefatos digitais se tornam instrumentos de aprendizagem por meio de esquemas de uso desenvolvidos pelos sujeitos. Em contextos STEAM com IA, artefatos incluem desde software de geometria dinâmica, calculadoras simbólicas e ambientes de programação até assistentes baseados em LLM e ferramentas de análise de dados com recursos de IA.

Abar e Lavicza (2019) discutem o uso do GeoGebra na produção de conhecimento matemático, examinando como esquemas de exploração e de prova emergem em atividades de modelagem. Drijvers (2019) analisa o papel de ferramentas digitais no pensamento matemático, enfatizando a importância de tarefas que promovam uso reflexivo de recursos computacionais. A integração de IA nesses ambientes acrescenta camadas de complexidade, pois sistemas inteligentes podem sugerir procedimentos, fornecer explicações e reorganizar representações.

Nessa perspectiva, TPACK-AI e I-TPACK podem ser vistos como quadros que orientam o professor na gestão da Gênese Instrumental em ambientes com IA ajudando a decidir quando, como e em que medida delegar à IA subtarefas (por exemplo, cálculos extensivos), e quando exigir que estudantes desenvolvam técnicas e justificações próprias. O desafio reside em equilibrar a exploração de potencialidades da IA com a preservação do trabalho matemático significativo.

PRINCÍPIOS PARA O DESENHO DE TAREFAS STEAM EM EDUCAÇÃO MATEMÁTICA ORIENTADAS POR TPACK-AI

Com base nos quadros discutidos, apresentam-se alguns princípios para o desenho de tarefas STEAM em Educação Matemática em contextos com IA:

1. Coerência entre objetivos matemáticos, recursos de IA e componentes de TPACK-AI. Cada tarefa deve especificar claramente que conceitos e práticas matemáticas estão em foco, quais funcionalidades de IA são mobilizadas (por exemplo, geração de exemplos, explicações, visualizações) e que conhecimentos tecnológicos, pedagógicos e de conteúdo são requeridos ao professor para orientar a atividade (Chiu, 2025b; Mishra; Koehler, 2006; Ning *et al.*, 2024).
2. Coordenação de registros semióticos com uso crítico de IA. As tarefas devem explorar a capacidade de sistemas de IA para produzir representações diversas, mas exigir que estudantes comparem, avaliem e justifiquem a adequação dessas representações sob a ótica dos conceitos matemáticos envolvidos (Drijvers, 2019; Duval, 2006).
3. Fomento da criatividade matemática por meio de exploração e variação. A IA pode ser usada para gerar variações de problemas, exemplos atípicos ou contextos alternativos, que servem de base para exploração criativa e para a formulação de conjeturas. O desenho de tarefas deve incluir momentos de escolha, tomada de decisão e reflexão sobre critérios de qualidade das soluções (Chiu *et al.*, 2023; Weng, Chiu, 2023).
4. Integração de analítica de aprendizagem baseada em *embeddings* com retroalimentação formativa. Sempre que dados textuais ou gráficos forem produzidos (justificações, descrições de modelos, diagramas), pode-se recorrer a *embeddings* para apoiar a análise do professor e, quando pertinente, a procedimentos de *clustering* para identificar padrões de resposta por similaridade, a retroalimentação formativa, desde que os resultados sejam

interpretados criticamente e apresentados de forma transparente aos estudantes (Lefebvre *et al.*, 2024; Misiejuk *et al.*, 2025; Pijeira-Díaz *et al.*, 2024; Rashid *et al.*, 2023).

5. Apoio às necessidades psicológicas básicas de estudantes e professores. À luz da SDT, tarefas e ambientes de aprendizagem devem apoiar autonomia (oferecendo escolhas significativas no uso de IA), competência (proporcionando desafios graduados e feedback construtivo) e relacionamento (favorecendo colaboração e discussão coletiva) (Chiu, 2024; Chiu; Chai, 2020). Isso vale tanto para estudantes quanto para professores, que necessitam de contextos formativos que legitimem experimentação e aprendizagem com IA.
6. Atenção às dimensões éticas e sociotécnicas da IA. Tarefas STEAM podem incluir discussão explícita sobre vieses algorítmicos, proteção de dados, propriedade intelectual e impactos sociais da IA articulando conhecimento matemático com literacia crítica em IA (Al-Abdullatif, 2024; Chiu, 2025a; Ng *et al.*, 2023).

Esses princípios articulam TPACK-AI, Registros Semióticos, Gênese Instrumental e SDT, oferecendo um quadro integrado para o desenho de tarefas que tomam a Matemática como linguagem de inovação, criatividade e design em ecossistemas STEAM mediados por IA.

IMPLICAÇÕES PARA A FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE MATEMÁTICA FORMAÇÃO INICIAL

Na formação inicial de professores de Matemática, os resultados discutidos sugerem a necessidade de incorporar explicitamente o TPACK-AI nos currículos de licenciatura. Isso pode ser concretizado por meio de unidades curriculares que:

- abordem fundamentos de IA e literacia em IA, com exemplos específicos do campo da Matemática (Chiu, 2025a; Ng *et al.*, 2023);
- promovam experiências de concepção, implementação e análise de tarefas STEAM com IA, apoiadas por quadros TPACK-AI e I-TPACK (Luaran, Al-Abdullah *et al.*, 2024; Seufert *et al.*, 2024);
- utilizem ferramentas de IA generativa de forma supervisionada, discutindo não apenas funcionalidades, mas também limitações e implicações éticas;
- explorem o papel da autoeficácia e da satisfação de necessidades psicológicas básicas no desenvolvimento de disposições favoráveis à integração de IA (Chiu; Chai, 2020; Ismaniati *et al.*, 2025; Xia *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025).

Programas de formação podem integrar sequências de atividades em que futuros professores projetam tarefas matemáticas com IA, testam-nas em microensinos ou estágios supervisionados e analisam evidências de aprendizagem (incluindo dados obtidos por analítica apoiada em *embeddings*) para refletir sobre a sua prática.

FORMAÇÃO CONTINUADA

Para professores em exercício, estudos sobre AI-TPACK apontam que desenvolvimento profissional focado apenas em aspetos técnicos tende a ser insuficiente para promover integração significativa de IA (Ning *et al.*, 2024; Paidicán Soto; Arredondo Herrera, 2024). Iniciativas de formação continuada podem, assim, ser estruturadas segundo as seguintes diretrizes:

- **Estruturação em torno de problemas autênticos de prática.** Oficinas podem partir de desafios reais encontrados em aulas de Matemática (por exemplo, dificuldades na avaliação

de produções abertas, na promoção de argumentação ou na diferenciação pedagógica) e explorar como IA e analítica de aprendizagem podem contribuir para enfrentá-los (Chiu *et al.*, 2023; Seufert *et al.*, 2024).

- **Foco em desenvolvimento de TPACK-AI e I-TPACK.** Atividades podem incluir análise de casos, redesenho de tarefas e elaboração de planos de aula que articulem conhecimentos tecnológicos, pedagógicos e de conteúdo com especificidades da IA (Al-Abdullatif, 2024; Chiu, 2025b).
- **Apoio institucional e cultura de experimentação.** Estudos sobre AI-TPACK sugerem que apoio institucional (infraestrutura, tempo, reconhecimento, políticas claras) influencia a disposição para integrar IA e o desenvolvimento de competências docentes (Alharbi, 2025). Programas de formação devem, portanto, ser acompanhados por estratégias de liderança pedagógica e políticas de suporte contínuo.

AGENDA DE PESQUISA E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura recente mostra que a interseção entre Educação Matemática, STEAM, IA e TPACK-AI constitui campo em rápida expansão, mas ainda em consolidação. Revisões de TPACK em contextos de IA apontam que muitos estudos se concentram em autorrelatos de conhecimento docente, havendo espaço para investigações que articulem análises de tarefas, práticas de sala de aula e resultados de aprendizagem (Ning *et al.*, 2024; Paidicán Soto; Arredondo Herrera, 2024).

No domínio da Educação Matemática, as pesquisas sobre IA ainda se concentram em análises bibliométricas e estudos exploratórios (Hosseini-Mohand *et al.*, 2025; Walkington, 2025), sendo desejável aprofundar investigações que examinem em detalhe como tarefas STEAM com IA afetam a construção de significados, o desenvolvimento de competências de modelagem, a argumentação e a criatividade matemática. A integração de analítica de aprendizagem baseada em *embeddings*, com atenção às noções de Registros Semióticos e Gênese Instrumental, constitui linha promissora, mas requer cuidados metodológicos e éticos (Lefebvre *et al.*, 2024; Misiejuk *et al.*, 2025; Pijera-Díaz *et al.*, 2024; Rashid *et al.*, 2023).

Do ponto de vista da formação docente, estudos como os de Ismaniati *et al.* (2025), Yang *et al.* (2025) e Xia *et al.* (2025) indicam que TPACK e TPACK-AI atuam em interação com autoeficácia, emoções e satisfação de necessidades psicológicas básicas na explicação da disposição para integrar IA. Pesquisas futuras podem explorar essas relações em contextos específicos da Educação Matemática e em diferentes níveis de ensino, bem como investigar como programas de formação estruturados com base em TPACK-AI e SDT influenciam práticas efetivas de sala de aula.

Em síntese, a integração de IA na Educação Matemática no contexto STEAM coloca a Matemática como linguagem central de modelagem, análise e design, mas exige repensar quadros teóricos e práticas formativas. A articulação entre TPACK-AI, Registros Semióticos, Gênese Instrumental, literacia em IA e teorias motivacionais oferece um conjunto consistente de referenciais para orientar esse processo, sustentando um projeto de Educação Matemática que responda às transformações tecnológicas contemporâneas sem perder de vista a centralidade da compreensão conceitual e da agência dos sujeitos.

REFERÊNCIAS

- ABAR, C. A. A. P.; LAVICZA, Z. Underlying theories for use of digital technologies in mathematics education. **Acta Scientiae**, Canoas, v. 21, n. 1, p. 39-54, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17648/acta.scientiae.v21iss1id4913>.
- AL-ABDULLATIF, A. M. Modeling teachers' acceptance of generative artificial intelligence use in higher education: The role of AI literacy, intelligent TPACK, and perceived trust. **Education Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 1209, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci14111209>.
- ALHARBI, A. Empowering teachers in AI-TPACK: Institutional support and teachers' readiness to adopt artificial intelligence in teaching. In: UBIQUITY INTERNATIONAL CONFERENCE, 2025, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2025.
- CHIU, T. K. F. Using self-determination theory to explain student STEM interest and identity development. **Instructional Science**, [s. l.], v. 52, p. 89-107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09642-8>.
- CHIU, T. K. F. AI literacy and competency: Definitions, frameworks, development and future research directions. **Interactive Learning Environments**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 3225-3229, 2025a. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2514372>.
- CHIU, T. K. F. Developing Intelligent-TPACK (I-TPACK) framework from unpacking AI literacy and competency: Implementation strategies and future research direction. **Interactive Learning Environments**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 4189-4192, 2025b. DOI: <https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2545053>.
- CHIU, T. K. F.; CHAI, C. S. Sustainable curriculum planning for artificial intelligence education: A self-determination theory perspective. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 14, p. 5568, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145568>.
- CHIU, T. K. F.; LI, Y. How can emerging technology impact STEM education? **Journal of STEM Education Research**, [s. l.], v. 6, p. 375-384, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00113-w>.
- CHIU, T. K. F. *et al.* Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education. **Computers & Education: Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 4, p. 100118, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118>.
- DRIJVERS, P. **Digital Tools and Mathematical Thinking**. Cham: Springer, 2019.
- DUVAL, R. A cognitive analysis of problems of comprehension in mathematics learning. **Educational Studies in Mathematics**, [s. l.], v. 61, p. 103-131, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10649-006-0400-z>.
- HOSSEIN-MOHAND, H. *et al.* AI in mathematics education: A bibliometric analysis of global trends and collaborations (2020–2024). **Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. em2576, 2025. DOI: <https://doi.org/10.29333/ejmste/15915>.
- ISMANIATI, C. *et al.* Harnessing self-efficacy: Mediating the connection between TPACK and AI intentions among teachers. **Journal of Pedagogical Research**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 109-126, 2025. DOI: <https://doi.org/10.33902/JPR.202531937>.

LEFEBVRE, G. *et al.* A new sentence embedding framework for the education and professional training domain with application to hierarchical multi-label text classification. **Data & Knowledge Engineering**, [s. l.], v. 150, p. 102281, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102281>.

LUARAN, J. E. *et al.* Investigating pre-service English teachers' I-TPACK and readiness to integrate generative AI-based tools. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION & ENTREPRENEURSHIP IN COMPUTING, ENGINEERING & SCIENCE EDUCATION (InvENT 2024), 2024. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2024.

MISHRA, P.; KOEHLER, M. J. Technological pedagogical content knowledge: A framework for teacher knowledge. **Teachers College Record**, [s. l.], v. 108, n. 6, p. 1017-1054, 2006.

MISIEJUK, K. *et al.* Mapping the landscape of generative artificial intelligence in learning analytics: A systematic literature review. **Journal of Learning Analytics**, [s. l.], v. 12, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.18608/jla.2025.8591>.

NG, D. T. K. *et al.* Design and validation of the AI literacy questionnaire: The affective, behavioral, cognitive and ethical approach. **British Journal of Educational Technology**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 1082-1104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.13411>.

NING, Y. *et al.* Teachers' AI-TPACK: Exploring the relationship between knowledge elements. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 978, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16030978>.

PAIDICÁN SOTO, M. Á.; ARREDONDO HERRERA, P. A. Artificial intelligence in technical pedagogical content knowledge (TPACK) contexts: A literature review. **Panorama**, [s. l.], v. 18, n. 35, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15765/pkjpww56>.

PIJEIRA-DÍAZ, H. J. *et al.* Evaluating Sentence-BERT-powered learning analytics for automated assessment of students' causal diagrams. **Journal of Computer Assisted Learning**, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 2667-2680, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcal.12992>.

QUIGLEY, C. F.; HERRO, D. STEAM design framework for transdisciplinary learning. **International Journal of STEM Education**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. 1-13, 2017.

RABARDEL, P. **Les hommes et les technologies: approche cognitive des instruments contemporains**. Paris: Armand Colin, 1995.

RASHID, M. P. *et al.* Can we reach agreement? A context- and semantic-based clustering approach with semi-supervised text-feature extraction for finding disagreement in peer-assessment formative feedback. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATIONAL DATA MINING, 16., 2023, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2023.

SEUFERT, S. *et al.* Developing an LLM-based copilot for teacher education: A TPACK-based design. In: EUROPEAN CONFERENCE ON TECHNOLOGY ENHANCED LEARNING, 2024, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2024.

SHULMAN, L. S. Those who understand: Knowledge growth in teaching. **Educational Researcher**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 4-14, 1986. DOI: <https://doi.org/10.3102/0013189X015002004>.

SOUSA, A.; PINHO, A. **STEAM Education in the 21st Century: Creative Interdisciplinarity in Teaching**. Porto: UPorto Press, 2022.

WALKINGTON, C. The implications of generative artificial intelligence for mathematics education. **School Science and Mathematics**, [s. l.], 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/ssm.18356>.

WENG, X.; CHIU, T. K. F. The mediating effects of engagement on the relationship between perceived digital inquiry and creativity. **Journal of Research on Technology in Education**, [s. l.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15391523.2022.2160392>.

XIA, Q. *et al.* Needs satisfaction mediates the relationships between TPACK, self-efficacy and teachers' willingness to integrate generative AI into higher education practices. **European Journal of Education**, [s. l.], v. 60, p. e70328, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejed.70328>.

YAKMAN, G. STEAM education: An overview of creating a model of integrative education. In: PATT CONFERENCE, 2008. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2008. p. 19-35.

YANG, Y. *et al.* The impact of TPACK on teachers' willingness to integrate generative artificial intelligence: The moderating role of negative emotions and the buffering effects of need satisfaction. **Teaching and Teacher Education**, [s. l.], v. 154, p. 104877, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tate.2024.104877>.