



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS PICOS
LICENCIATURA EM QUÍMICA

MATHEUS BEZERRA SANTOS

**A Inserção de Tecnologias Digitais no Ensino de Química: Uma Análise
Bibliométrica**

PICOS-PI
2025

MATHEUS BEZERRA SANTOS

**A Inserção de Tecnologias Digitais no Ensino de Química: Uma Análise
Bibliométrica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de Licenciatura em química do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí, Campus Picos-PI.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Brito de Souza Filho.

PICOS-PI

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Santos, Matheus Bezerra

S237i A inserção de tecnologias digitais no ensino de química : uma análise
bibliométrica / Matheus Bezerra Santos. - 2025.
46 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) - Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Picos, 2025.

Orientador : Prof Dr. Luiz Brito de Souza Filho.

1. Bibliometria. 2. Tecnologias Digitais. 3. Educação Química. 4.
Mapeamento Científico. I. Título.

CDD - 540

Elaborado por Silvio de Carvalho Gomes Coutinho CRB 3/1362

MATHEUS BEZERRA SANTOS

**A Inserção de Tecnologias Digitais no Ensino de Química: Uma Análise
Bibliométrica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para obtenção do diploma
do Curso de Licenciatura em química do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí, Campus Picos-PI.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Brito de Souza Filho (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Ma. Katrícia Maria Cardoso
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dr. Ézio Raul Alves de Sá
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho aos meus pais,
amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e servidores do IFPI do Campus Picos, pois todos direto e indiretamente contribuíram para o alcance desse resultado.

Agradeço, também, a minha família que deu todo o apoio necessário para que eu chegasse até aqui. Agradeço ao meu Deus, que me deu força quando mais precisava.

RESUMO

A inserção de tecnologias digitais no ensino de química tem ganhado relevância crescente na comunidade acadêmica. Este estudo teve como objetivo mapear e analisar a produção científica da área por meio de uma revisão bibliométrica. Para tanto, a metodologia consistiu na análise de 742 documentos publicados entre 2020 e 2025. Os resultados revelam um campo de pesquisa em consistente ascensão, com a produção de artigos aumentando a cada ano. A partir desses dados, a análise de produtividade e impacto identificou o *Journal of Chemical Education* como a principal fonte de publicação, e o Brasil como um dos 10 países com maior contribuição. Autores como Holme, T. e Cooper, M. foram reconhecidos como os mais influentes no cenário. O mapeamento temático revelou que a pesquisa é impulsionada por temas centrais, como a interseção entre "química, educação e estudantes", com a emergência de nichos de pesquisa como a tecnologia educacional e a inteligência artificial. Conclui-se que o campo é dinâmico e liderado por um grupo de pesquisadores e instituições bem definidos, mas com uma estrutura de colaboração fragmentada. As descobertas aqui apresentadas fornecem, assim, uma visão estratégica para a identificação de lacunas de pesquisa e para o avanço das práticas pedagógicas em química.

Palavras-chave: Bibliometria; Educação Química; Tecnologias Digitais; Mapeamento Científico.

ABSTRACT

The insertion of digital technologies in chemistry teaching has gained increasing relevance in the academic community. This study aimed to map and analyze the scientific production in the area through a bibliometric review. The methodology consisted of analyzing 742 documents published between 2020 and 2025. The results reveal a consistently growing research field, with the production of articles increasing each year. From this data, the productivity and impact analysis identified the **Journal of Chemical Education** as the main publication source and Brazil as one of the top 10 contributing countries. Authors such as **Holme, T.** and **Cooper, M.** were recognized as the most influential in the field. The thematic mapping revealed that the research is driven by central themes, such as the intersection between "chemistry, education, and students," with the emergence of research niches like educational technology and artificial intelligence. It is concluded that the field is dynamic and led by a well-defined group of researchers and institutions, but with a fragmented collaboration structure. The findings presented here provide a strategic view for identifying research gaps and advancing pedagogical practices in chemistry.

Keywords: Bibliometrics; Chemistry Education; Digital Technologies; Science Mapping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxograma do processo de seleção dos registros para a revisão bibliométrica.	21
Figura 2	Evolução da produção anual de artigos sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química (2020-2025)	25
Figura 3	As 10 fontes mais relevantes por número de documentos.	28
Figura 4	Autores mais relevantes por número de documentos.	31
Figura 5	Distribuição geográfica da produção científica por país.	33
Figura 6	Nuvem de palavras dos termos mais frequentes.	34
Figura 7	Rede de co-ocorrência de termos de pesquisa.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Principais informações sobre metadados coletados de 742 documentos selecionados para a revisão.	23
Tabela 2	Média de citações por ano de publicação (2020-2025).	26
Tabela 3	Impacto local das fontes (2020-2025).	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Tecnologias Digitais No Ensino De Química	15
3.2 Bibliometria Como Ferramenta De Análise Científica	16
4 METODOLOGIA.....	18
4.1 Modalidade De Pesquisa	18
4.2 Instrumentos De Coleta E Análise De Dados	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5.1 Análise quantitativa das tendências editoriais	21
5.2 Produção Anual e Evolução Temporal	22
5.3 Impacto da Produção Científica: Análise das Citações por Ano	24
5.4 Fontes Mais Relevantes	26
5.5 Impacto Local das Fontes.....	27
5.6 Autores e Liderança Intelectual	29
5.7 Produção Científica por País	30
5.8 Análise de Conteúdo e Temas de Pesquisa	32
5.9 Análise de Co-ocorrência de Palavras-Chave e Mapeamento Temático.....	33
5.9 Discussão Geral e Síntese dos Resultados.....	35
6. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

O avanço das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) tem transformado significativamente o cenário educacional, impulsionado pelo crescente uso de dispositivos móveis e pelo desenvolvimento de novas metodologias de ensino. Essa evolução impõe desafios tanto para os professores quanto para as instituições de ensino, que precisam adaptar suas práticas pedagógicas para incorporar efetivamente essas tecnologias ao processo de ensino-aprendizagem (Almeida; Santos, 2020; Belarmino *et al.*, 2020; Mangucci *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2021).

No entanto, a simples adoção de ferramentas digitais no ensino de Química não garante, por si só, inovação e melhoria no aprendizado. É necessário revisar e aprimorar as estratégias pedagógicas para que as TICs possam engajar alunos e professores, tornando o ensino mais dinâmico e significativo (Ferreira & Santos, 2023). Entre as ferramentas mais utilizadas nesse contexto está o PhET Interactive Simulations, um projeto da Universidade do Colorado que oferece simulações interativas gratuitas em diversas áreas da ciência, permitindo que os alunos explorem conceitos de forma visual e prática (Araújo & Oliveira, 2022).

A utilização de plataformas digitais, simulações virtuais e realidade aumentada tem se mostrado um recurso valioso para tornar o ensino de Química mais interativo e acessível. Plataformas como o Google Classroom, Moodle e Microsoft Teams facilitam a organização de conteúdos, a comunicação entre professores e alunos e o acompanhamento das atividades (Sousa *et al.*, 2024).

Já as simulações virtuais, como as oferecidas pelo PhET, ChemCollective e Labster, possibilitam a realização de experimentos em ambientes virtuais, permitindo a exploração segura de fenômenos químicos que, muitas vezes, seriam inacessíveis em laboratórios escolares tradicionais. A realidade aumentada também tem se destacado como uma inovação relevante (Costa & Silva, 2023).

A tecnologia de Realidade Aumentada pode ser mais bem explorada para fins educacionais, visto que:

A experiência constante dos usuários pode atingir áreas de cognição que não são alcançadas pelos métodos tradicionais. Um dos motivos é a necessidade de abstrair entidades químicas invisíveis, que nem

sempre é fácil conectar aos fenômenos em nível atômico à realidade do aluno. (Ferreira; Santos, 2020, p. 7)

Essas ferramentas ampliam o engajamento dos estudantes ao oferecer uma experiência mais imersiva, contribuindo para a construção de um conhecimento mais significativo e duradouro (Valente, 2019).

Situações imprevistas, como a pandemia da COVID-19 em 2020, evidenciaram a importância dessas tecnologias para garantir a continuidade da educação em cenários adversos. O contexto emergencial impulsionou a adoção de modelos híbridos e remotos, destacando o papel das TICs como aliadas do ensino em tempos de crise (Silva et al., 2021).

Apesar dos avanços, ainda persistem desafios, especialmente em países como o Brasil, onde a desigualdade social limita o acesso equitativo a essas tecnologias. Nesse sentido, Macedo (2021, p. 44) afirma que “a pandemia da COVID-19 apenas descortinou desigualdades que já eram uma realidade”, indicando que a falta de acesso e de alfabetização tecnológica é um obstáculo para um ensino verdadeiramente igualitário. A fim de mitigar tais desigualdades, torna-se fundamental investir em políticas públicas que promovam a inclusão digital e a formação continuada de professores, por meio da criação de programas de capacitação e fornecimento de infraestrutura tecnológica nas escolas, para o uso pedagógico das ferramentas tecnológicas.

Além disso, a alta taxa de evasão nos cursos de ciências exatas, como a Química, representa um desafio crítico no ensino superior. Esse fenômeno compromete a formação de profissionais e a sustentabilidade dos cursos, sendo frequentemente associado à rigidez curricular, dificuldades de aprendizagem e à falta de integração dos estudantes (Garcia; Gomes, 2023).

Nesse contexto, pesquisas sugerem que a reformulação curricular, aliada à integração eficaz das tecnologias digitais, pode contribuir para reduzir esses índices e melhorar o engajamento dos estudantes. A adoção de metodologias ativas e o uso de recursos como laboratórios virtuais e aplicativos de realidade aumentada mostram potencial para tornar o ensino mais dinâmico e atrativo, combatendo o desinteresse e

a evasão (Godoy; Almeida, 2017; Siqueira; Nunes, 2024).

A análise bibliométrica é uma técnica estatística que quantifica a produção de conhecimento científico de uma área, permitindo identificar tendências de pesquisa, os autores mais produtivos e as instituições mais atuantes (Araújo, 2006; Cruz; Silva, 2021). A partir da análise dessas variáveis, é possível mapear os principais atores e temas, o que fornece um alicerce sólido para o desenvolvimento de novas investigações.

A partir da análise dessas variáveis, é possível mapear os principais atores e temas da área. Com os nomes dos autores, suas afiliações e os endereços de correspondência, é possível mapear os pesquisadores e as instituições de maior destaque. Já os títulos, as palavras-chave e os resumos dos artigos são cruciais para identificar os temas mais relevantes e, por meio de uma análise detalhada, apontar possíveis lacunas de pesquisa, fornecendo um alicerce sólido para o desenvolvimento de novas investigações.

Uma análise bibliométrica torna-se essencial para organizar e sintetizar o conhecimento sobre o uso de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) no ensino de Química, permitindo identificar tendências e lacunas na literatura. Considerando os altos índices de evasão em cursos de ciências exatas, este estudo se justifica pela necessidade de investigar o impacto das TICs na educação química para auxiliar na criação de estratégias que melhorem o engajamento e a retenção de estudantes. Para tanto, o objetivo é realizar uma análise bibliométrica de publicações indexadas nas bases de dados Scopus e Web of Science dos últimos 5 anos. Utilizando a ferramenta RStudio e a biblioteca Bibliometrix (Aria; Cuccurullo, 2017), será possível mapear tendências e compreender como essas tecnologias têm sido aplicadas. Espera-se que os resultados contribuam para o aprimoramento das práticas pedagógicas, fortalecendo a utilização das TICs e promovendo um aprendizado mais eficiente e inclusivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o uso de tecnologias digitais no ensino de Química por meio de uma revisão bibliométrica das bases de dados Scopus e Web of Science, utilizando as ferramentas RStudio e Bibliometrix para mapear tendências e contribuir para o aprimoramento das práticas pedagógicas a partir da identificação de lacunas na pesquisa e da prospecção de novas abordagens teóricas.

2.2 Objetivos Específicos

- Mapear as tendências editoriais da produção científica sobre o tema, analisando a evolução temporal da produção e o impacto das publicações nas bases de dados selecionadas.
- Identificar os autores mais influentes, os periódicos mais relevantes e a contribuição por país para a pesquisa sobre tecnologias digitais no ensino de Química.
- Analisar os temas centrais e emergentes da literatura, investigando a co-ocorrência de palavras-chave para mapear os focos de pesquisa e as lacunas existentes na área.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Tecnologias Digitais no Ensino de Química

A inserção das tecnologias digitais no ensino de Química tem se mostrado uma ferramenta essencial para a modernização do aprendizado, possibilitando abordagens mais dinâmicas e interativas. As Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) oferecem novas formas de transmissão do conhecimento, favorecendo a compreensão de conceitos abstratos e ampliando as possibilidades de ensino (Moreira, 2021).

A integração de *softwares* educacionais, simulações virtuais, ambientes de aprendizagem e jogos didáticos no ensino de Química representa uma das principais transformações pedagógicas impulsionadas pelas TICs. Esses recursos possibilitam que os alunos explorem os conteúdos de forma visual e interativa, o que se associa a um maior engajamento e à construção de um aprendizado mais significativo (Sousa *et al.*, 2021). Contudo, a efetividade dessas ferramentas não dispensa a figura do professor, cuja atuação se ressignifica. A tecnologia atua como um catalisador que exige do docente um novo papel, tornando-o um mediador essencial no processo de ensino aprendizagem (Matos; Santos, 2023). Portanto, a análise de como essas ferramentas são aplicadas e o papel do professor nesse contexto constituem um campo de estudo relevante a ser mapeado.

Além disso, plataformas de ensino a distância como *Moodle*, *Google Classroom* e *Microsoft Teams*, bem como materiais didáticos digitais, tornaram-se ferramentas ubíquas, especialmente após o período de ensino remoto imposto pela pandemia da COVID-19. A adoção em larga escala dessas plataformas não apenas garantiu a continuidade educacional, mas também catalisou a implementação de metodologias ativas. Através de funcionalidades como fóruns de discussão, ferramentas colaborativas e sistemas de *feedback* automatizado, o aprendizado se potencializa ao tornar os estudantes protagonistas do processo de ensino-aprendizagem (Sousa; Oliveira; Alves, 2021).

A literatura científica aponta que a integração dessas tecnologias é crucial para suprir as lacunas da educação tradicional, especialmente na Química, em que a dificuldade de visualizar conceitos abstratos e a limitação de tempo em laboratórios

físicos podem ser superadas por simulações e ambientes virtuais (Fernandes, 2022). Esse uso estratégico de ferramentas digitais demonstra como a tecnologia pode ser uma resposta eficaz aos desafios intrínsecos do ensino de ciências.

Em um contexto mais amplo, a pesquisa demonstra que a inserção planejada de TICs promove maior interação, dinamismo e acesso a recursos diversificados, elementos que se mostram essenciais para o engajamento estudantil e a melhoria da qualidade de ensino (Pinheiro; Andrade, 2023). Essa abordagem reforça a ideia de que a tecnologia, quando utilizada de forma consciente, pode transformar a experiência de aprendizado, tornando-a mais relevante e atrativa para os alunos.

Outro aspecto importante é a utilização de tecnologias imersivas, como as realidades aumentadas (RA) e a realidade virtual (RV). Essas ferramentas permitem que os alunos experimentem fenômenos químicos de maneira simulada, reduzindo riscos e custos associados às práticas laboratoriais convencionais (Fonseca *et al.*, 2020). O uso dessas tecnologias tem um impacto positivo significativo na compreensão de conteúdos abstratos, como a estrutura molecular, reações químicas e a geometria das orbitais atômicas (Borges; Mendonça, 2022).

Em um estudo recente, evidenciou-se que a visualização tridimensional proporcionada pela RA aprimora o raciocínio espacial dos estudantes, que é um desafio conhecido no ensino de Química (Cavalcante; Silva, 2023). Assim, as tecnologias imersivas se consolidam como recursos pedagógicos valiosos, que oferecem uma experiência de aprendizado inovadora e mais eficaz para temas complexos, ao superarem barreiras de visualização e abstração.

Portanto, a inclusão das tecnologias digitais no ensino de Química não apenas moderniza o ensino, mas também promove uma aprendizagem mais acessível e contextualizada com as demandas contemporâneas da sociedade.

3.2 Bibliometria como Ferramenta de Análise Científica

A bibliometria tem se consolidado como um método essencial para a análise da produção científica em diversas áreas do conhecimento, incluindo o ensino de Química. Segundo Cruz e Silva (2021), trata-se de uma técnica estatística e quantitativa que permite mapear a evolução de temas específicos, identificar os

autores e as referências mais influentes, bem como avaliar o impacto e a relevância das publicações. Ao analisar indicadores como o volume e os padrões de crescimento da literatura, a análise bibliométrica proporciona uma visão abrangente sobre o tema, sendo uma ferramenta poderosa para identificar tendências e lacunas de pesquisa.

bibliometria tem se consolidado como um método essencial para a análise objetiva da produção científica em diversas áreas, incluindo o ensino de Química. Segundo Cruz e Silva (2021), trata-se de uma técnica estatística e quantitativa que permite mapear a estrutura intelectual de um campo, identificando autores, instituições e as temáticas mais influentes. A bibliometria atua por meio da contagem e da análise de indicadores de produção, como o número de publicações, colaborações entre pesquisadores e a frequência de citação de artigos (Araújo, 2006). Essa abordagem sistemática proporciona um panorama abrangente da evolução do conhecimento, indo além de uma revisão qualitativa tradicional (Santos; Oliveira, 2023).

Para a coleta de dados, bases de dados como *Scopus* e *Web of Science* são amplamente utilizadas em estudos bibliométricos por sua abrangência, rigor na indexação e fornecimento de dados estruturados, essenciais para a análise automatizada. A análise desses dados é realizada por meio de ferramentas especializadas, como o software RStudio em conjunto com a biblioteca Bibliometrix, desenvolvida especificamente para este fim (Aria; Cuccurullo, 2017). Essa combinação de bases de dados robustas com ferramentas de análise refinadas permite um processamento eficiente de um grande volume de publicações, gerando visualizações e métricas que revelam a dinâmica da produção acadêmica e a interconexão entre os estudos (Silva; Souza, 2024).

A aplicação da bibliometria no presente estudo visa, portanto, ir além de uma simples revisão da literatura. Ao utilizar as ferramentas mencionadas, será possível compreender como a literatura tem abordado a inserção de tecnologias digitais no ensino de Química, identificando os temas mais emergentes e os padrões de colaboração científica. A partir dessa análise, será viável uma reflexão crítica sobre os desafios e potencialidades da temática, permitindo identificar lacunas no conhecimento e fundamentar novas direções para pesquisas futuras na área, o que é um dos principais papéis desse tipo de estudo (Godoy; Almeida, 2017).

4 METODOLOGIA

4.1 Modalidade de Pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica e bibliométrica, de natureza quantitativa, com o objetivo de analisar a evolução das pesquisas sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de Química. A **pesquisa bibliográfica** é uma etapa essencial do processo científico, pois permite ao pesquisador obter uma visão global do tema, sistematizar as informações disponíveis e fornecer o referencial teórico para embasar o estudo. Conforme discutido por Moreira (2004) e Webster e Watson (2002), a revisão da literatura deve ir além do simples levantamento de publicações, exigindo uma análise crítica dos conceitos, métodos e abordagens utilizadas nos estudos anteriores.

Por sua vez, a bibliometria permite quantificar a produção científica e identificar padrões e tendências na literatura acadêmica (Echer, 2001; Kothary, 2004; Silva & Menezes, 2005). Segundo Rowley e Slack (2004), a aplicação de técnicas bibliométricas auxilia na estruturação da pesquisa ao evidenciar as contribuições mais relevantes, os autores de destaque e as redes de colaboração científica.

4.2 Instrumentos de Coleta e Análise De Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de buscas sistemáticas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, acessadas através do portal de periódicos da CAPES. Os documentos analisados compreendem o período de 2020 a 2025, considerando que este intervalo reflete a produção científica mais recente sobre o tema. Foram incluídos apenas artigos completos, publicados em inglês, por ser o idioma de maior impacto na disseminação de pesquisas científicas globais.

A estratégia de busca avançada foi formulada para garantir a relevância dos documentos, utilizando descritores que unem o campo da tecnologia e o ensino de Química. A busca foi refinada por meio da utilização de operadores booleanos como "AND" e "OR". O operador "AND" foi usado para combinar termos, garantindo que os documentos recuperados contivessem a união de conceitos como "tecnologia" e "ensino de química". Já o operador "OR" foi empregado para buscar termos sinônimos ou relacionados, ampliando a abrangência da pesquisa. Essa abordagem buscou a

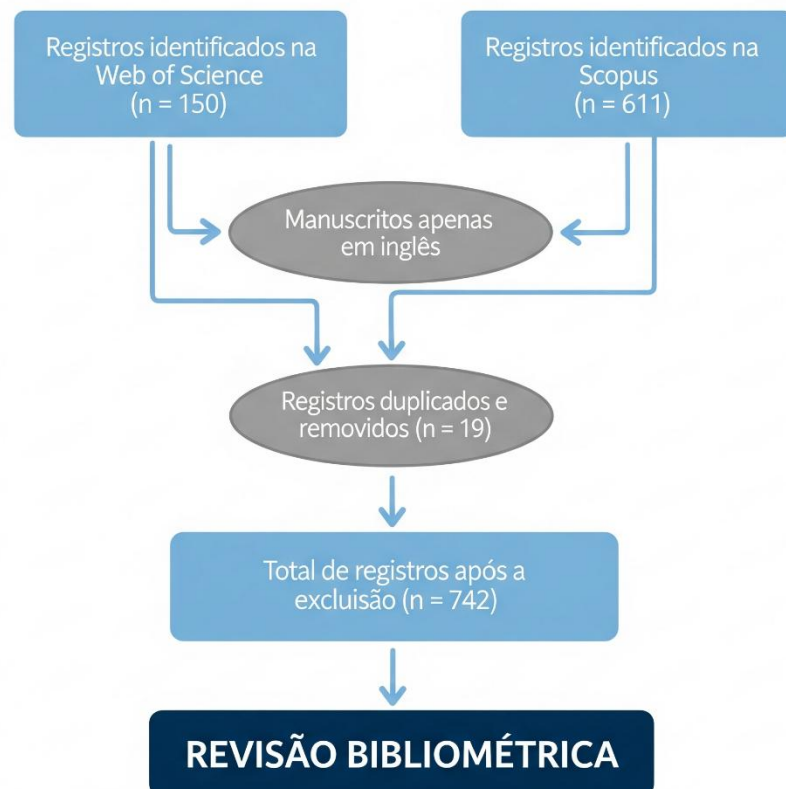
interseção de termos-chave para evitar documentos que abordam apenas um dos temas, garantindo maior especificidade aos resultados.

Exemplo de *string* de busca (adaptada para maior precisão):

TITLE-ABS-KEY ("educational technology" OR "digital tool" OR "virtual simulation") AND ("chemical education" OR "chemistry teaching") AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026

Após a coleta, os dados de ambas as bases foram consolidados em um único arquivo, e os documentos duplicados foram removidos. O processo de seleção e filtragem dos registros está ilustrado na Figura 1, que demonstra a quantidade de artigos identificados em cada base, a aplicação dos critérios de inclusão (manuscritos em inglês) e a remoção de duplicatas, resultando no número final de documentos para análise.

Figura 1. Fluxograma do processo de seleção dos registros para a revisão bibliométrica.



Fonte: Autoria própria 2025.

Para a análise bibliométrica, foi utilizado o *software RStudio* em conjunto com a biblioteca *Bibliometrix*, que permite a extração, organização e visualização dos dados de forma automatizada e confiável.

Os principais indicadores bibliométricos a serem analisados incluem:

- O número de publicações por ano, para avaliar a evolução da pesquisa na área.
- Os principais periódicos, autores, instituições e países mais relevantes no tema, para mapear a produção científica.
- A análise de concorrência de palavras-chave, para identificar as tendências de pesquisa e temas emergentes.
- As redes de coautoria e colaboração institucional, para mapear a interação e a colaboração entre os pesquisadores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise quantitativa das tendências editoriais

O presente estudo utilizou um conjunto de dados robusto, composto por 742 documentos que abordam a inserção de tecnologias digitais no ensino de química. A coleta, realizada a partir da fusão de duas bases de dados, *Scopus* e *Web of Science*, resultou em uma amostra significativa para a análise bibliométrica, um método reconhecido por sua capacidade de mapear a estrutura e a dinâmica da produção científica (Zupic; Cater, 2015; Celestino *et al.*, 2024). A Tabela 1 apresenta as informações e métricas descritivas essenciais da base de dados utilizada.

Tabela 1. Principais informações sobre metadados coletados de 742 documentos selecionados para a revisão.

PRINCIPAIS INFORMAÇÕES SOBRE DADOS	<i>Resultados</i>
<i>Período de tempo</i>	2020:2025
<i>Fontes (Periódicos, Livros etc.)</i>	97
<i>Documentos</i>	742
<i>Taxa de crescimento anual %</i>	-3,4
<i>Idade média do documento</i>	2,46
<i>Média de citações por documento</i>	7,049
<i>Referências</i>	0
CONTEÚDO DO DOCUMENTO	
<i>Palavras-chave Plus</i>	965
<i>Palavras-chave do autor</i>	1397
AUTORES	
<i>Autores</i>	2304
<i>Autores de documentos de autoria única</i>	93
COLABORAÇÃO DE AUTORES	
<i>Documentos de autoria única</i>	134
<i>Coautores por documento</i>	3,89
<i>Coautorias internacionais %</i>	3,235

Fonte: Autoria própria 2025.

A análise inicial dos dados revela um foco temporal bastante específico e atual. O período, compreendido entre 2020 e 2025, indica que a revisão bibliométrica está concentrada nas pesquisas mais recentes da área. A idade média dos documentos, de apenas 2,46 anos, corrobora essa observação, demonstrando que o estudo reflete o estado da arte do tema (Marques *et al.*, 2025).

A produção científica, embora notável em volume com 742 documentos, distribuídos em 97 fontes distintas, apresenta uma taxa de crescimento anual negativa de 3,4%. Este dado, que demanda uma análise mais aprofundada, pode ser interpretado como um período de estabilização da pesquisa após um ciclo de expansão (Zupic; Cater, 2015). Em contrapartida, a média de citações por documento, de 7,049, sugere um impacto considerável dos trabalhos na comunidade acadêmica. Um ponto limitante na base de dados é a ausência completa de dados de referências, o que impediu a aplicação de análises como a co-citação e o acoplamento bibliográfico. Essa limitação metodológica é reconhecida na literatura, que aponta a inconsistência de dados como um desafio comum em análises bibliométricas (Martins, 2022). Essa restrição direcionou o foco da análise para outros indicadores bibliométricos.

A análise do conteúdo dos documentos revelou uma distinção notável entre as palavras-chave geradas automaticamente (*Keywords Plus*) e as fornecidas pelos próprios autores (Palavras-chave do autor). Com 1397 palavras-chave fornecidas pelos autores, em comparação a 965 *Keywords Plus*, a importância de utilizar a terminologia adotada pela própria comunidade científica para o mapeamento temático é evidenciada (Quevedo-Silva *et al.*, 2016).

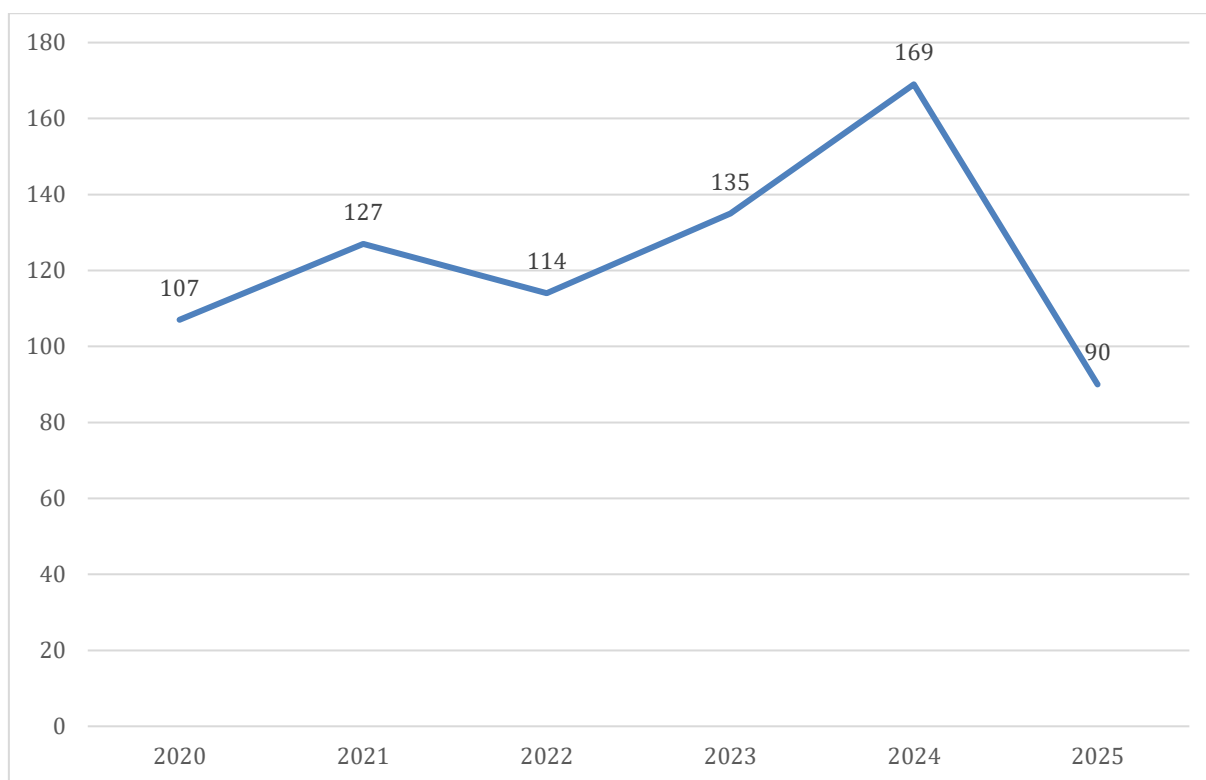
No que tange à autoria e colaboração, a base de dados identificou um total de 2304 autores. Embora 134 documentos sejam de autoria única, a média de 3,89 coautores por documento demonstra que a colaboração é a norma na área de estudo (Marques *et al.*, 2025). O índice de colaboração é uma métrica comum em estudos bibliométricos (Laurents *et al.*, 2019), sugerindo que a pesquisa sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química é, portanto, um esforço predominantemente coletivo.

Em suma, a análise quantitativa inicial serve como um alicerce para as análises mais detalhadas a seguir. As próximas seções explorarão a fundo as redes de colaboração, os temas mais relevantes e os autores mais influentes, construindo uma visão completa das tendências e da estrutura da pesquisa na área.

5.2 Produção Anual e Evolução Temporal

A análise da evolução da produção científica ao longo do tempo é fundamental para compreender as tendências e o interesse da comunidade acadêmica no tema (Zaim *et al.*, 2018). A figura 2 ilustra a quantidade de artigos publicados anualmente sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química no período de 2020 a 2025.

Figura 2. Produção anual de artigos sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química (2020-2025).



Fonte: Autoria própria 2025.

A análise da produção anual revela uma tendência de crescimento significativa, porém com algumas oscilações. Iniciando com 107 artigos em 2020, o número de publicações subiu para 127 em 2021, caindo ligeiramente em 2022 para 114. Em seguida, a produção retomou um crescimento robusto, atingindo o pico máximo de 169 artigos em 2024. Este pico pode ser atribuído a diversos fatores, como o aumento do interesse pela temática, o desenvolvimento de novas tecnologias ou a publicação de estudos financiados em larga escala.

É importante notar a acentuada queda na produção em 2025, com apenas 90 artigos. Essa redução pode ser a principal razão por trás da taxa de crescimento anual

negativa de 3,4% observada na análise anterior. É crucial considerar que o número de 90 artigos reflete os dados coletados até julho de 2025. Como as bases de dados bibliográficas são atualizadas continuamente, essa contagem é provisória e, portanto, subestimada. Em uma projeção linear, a produção anual completa para 2025 poderia se aproximar de 180 artigos (VAN ECK; WALTMAN, 2014).

Apesar da queda em 2025, a tendência geral entre 2020 e 2024 demonstra um interesse crescente e uma maturidade na pesquisa do tema. O aumento da produção de 2022 a 2024 sugere que a área está em um período de expansão, com um número cada vez maior de pesquisadores publicando seus resultados. Essa evolução também pode estar ligada a eventos globais recentes, como a pandemia de COVID-19, que forçou uma rápida adoção de tecnologias digitais na educação e, consequentemente, impulsionou a pesquisa sobre o tema nos anos seguintes (Al-Jubari *et al.*, 2023).

Em resumo, a análise da produção anual mostra que, embora haja um possível ponto de inflexão em 2025, o interesse e a produção científica sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química cresceram de forma consistente nos últimos anos, atingindo seu ponto mais alto em 2024. As próximas etapas da análise, como o mapeamento dos autores e dos periódicos mais produtivos, poderão aprofundar a compreensão sobre quem está conduzindo essa pesquisa e onde ela está sendo publicada.

5.3 Impacto da Produção Científica: Análise das Citações por Ano

O impacto da produção científica, medido pelo número de citações que um trabalho recebe, é um indicador crucial da sua relevância para a comunidade acadêmica (Waltman, 2016). A Tabela 2 detalha o comportamento das citações por ano de publicação, fornecendo uma visão mais aprofundada da influência dos artigos sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química.

Tabela 2. Média de citações por ano de publicação (2020-2025).

Ano	Média de Citações por Artigo	N	Média de Citações por Ano	Anos citáveis
2020	14.62	107	2.44	6
2021	11.08	127	2.22	5
2022	7.71	114	1.93	4
2023	7.40	135	2.47	3

2024	2.17	169	1.08	2
2025	0.16	90	0.16	1

Fonte: Autoria própria 2025.

Uma primeira observação na Tabela 2 é a tendência de queda na Média de Citações por Artigo para os anos mais recentes. Este padrão é um fenômeno comum e esperado na ciência, uma vez que artigos publicados em anos mais antigos (como 2020) tiveram mais tempo para serem lidos, analisados pela comunidade e, consequentemente, citados em trabalhos subsequentes (*RADICCHI et al.*, 2020). O valor de 14,62 citações por artigo para o ano de 2020 reflete esse ciclo de acumulação de citações ao longo de seis anos, enquanto o valor de 0,16 para 2025 demonstra que os artigos mais recentes ainda estão no início de seu ciclo de impacto.

Para uma avaliação mais justa e precisa, a métrica de Média de Citações por Ano por Artigo é mais adequada, pois normaliza o impacto dos trabalhos pelo tempo em que estiveram disponíveis para citação (Van Eck; Waltman, 2014). A análise dessa métrica mostra um padrão mais consistente. Os artigos publicados entre 2020 e 2023 mantiveram um nível de impacto notável, variando entre 1,93 e 2,47 citações por ano. O pico de 2,47 em 2023 é particularmente significativo, sugerindo que, apesar de o tempo de exposição ter sido menor, os trabalhos daquele ano foram excepcionalmente relevantes e rapidamente atraíram a atenção da comunidade científica.

A queda acentuada na média de citações por ano em 2024 (1,08) e 2025 (0,16) não deve ser interpretada como uma diminuição da qualidade da pesquisa, mas sim como um reflexo do tempo necessário para que um artigo acumule citações (Mendes-Da-Silva, 2018). Artigos recém-publicados raramente acumulam citações nos primeiros meses após a sua publicação. Portanto, os valores de 2024 e, especialmente, de 2025 (considerando que o ano de 2025 está em curso) são provisórios e devem ser reavaliados em futuras análises, quando esses documentos tiverem mais tempo para acumular impacto.

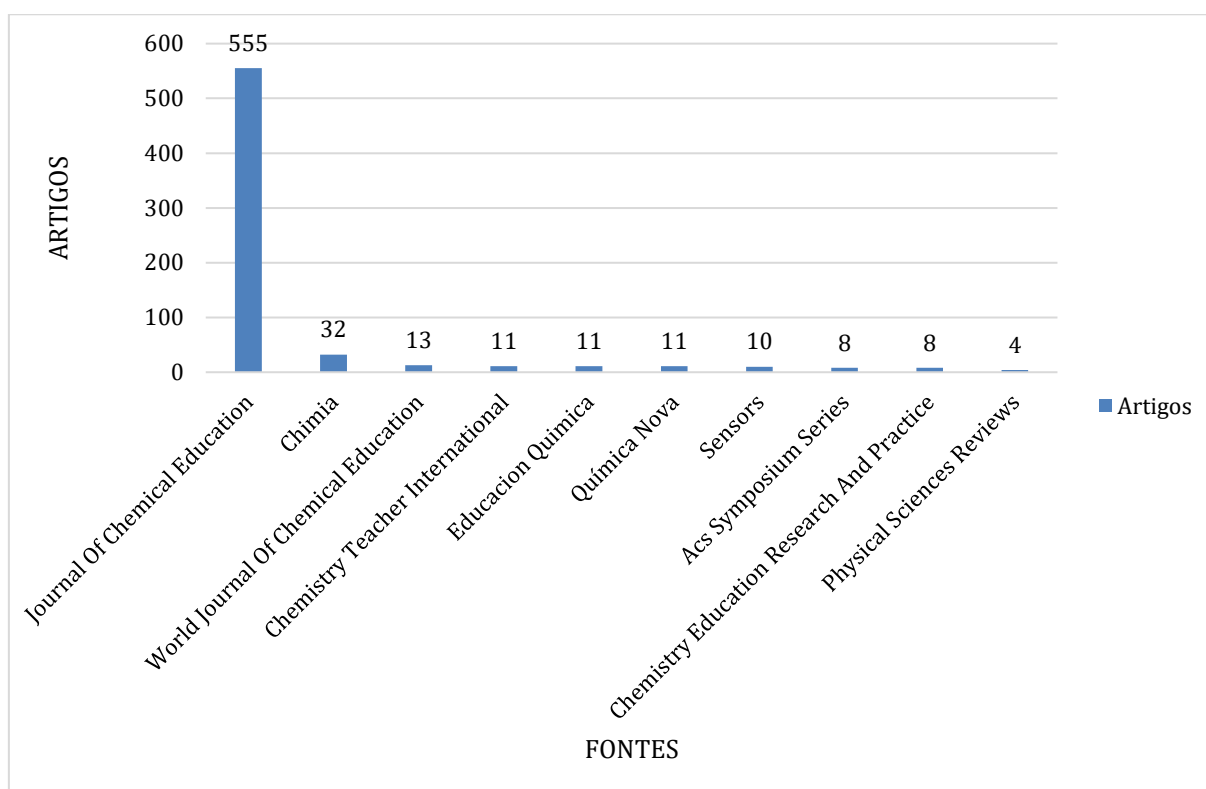
Em suma, a análise de citações demonstra que a produção científica sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química tem um impacto consistente, com um pico de relevância em 2023. Essa tendência ressalta a importância e a vitalidade da área de pesquisa (Leydesdorff, 2014). A combinação de uma produção

crescente (observada na seção anterior) e de um impacto consistente sugere um campo de estudo dinâmico e em plena expansão.

5.4 Fontes mais Relevantes

A identificação das fontes (periódicos, livros etc.) que mais publicam sobre um determinado tema é fundamental para entender onde a pesquisa está sendo divulgada e quais são os veículos mais influentes da área (Giménez-Toledo, 2011). A figura 3 apresenta os 10 periódicos mais relevantes em termos de número de artigos na base de dados analisada.

Figura 3. Os 10 periódicos mais relevantes por número de documentos.



Fonte: Autoria própria 2025.

A figura 3 demonstra claramente uma predominância absoluta de uma única fonte: o Jornal de Educação Química (*JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION*). Com 555 artigos, este periódico é responsável por uma parte majoritária da produção na área de tecnologias digitais no ensino de química, consolidando-se como o veículo de publicação mais importante e influente (Perrault, 2018). Este dado ressalta o seu papel central na divulgação e no desenvolvimento da pesquisa.

As demais fontes, embora relevantes, publicaram um número consideravelmente menor de artigos, variando de 32 a 4 publicações no período analisado. Periódicos como CHIMIA, Jornal Mundial de Educação Química (*WORLD JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION*), Química Nova e *Educación Química* demonstram interesse na temática, mas em um volume de produção muito inferior ao líder. A presença de fontes como *Sensors* e *Physical Sciences Reviews* também é notável, indicando que a pesquisa se estende a áreas tecnológicas e multidisciplinares, não se restringindo apenas a periódicos de educação em química (Morillo-Velarde *et al.*, 2020).

A grande disparidade na produção, com uma fonte dominando a vasta maioria das publicações, sugere que o *Journal of Chemical Education* é o principal ponto de referência para os pesquisadores da área. Essa centralidade, por um lado, pode ser vista como uma força, garantindo que o conhecimento mais relevante seja concentrado e facilmente acessível à comunidade. Por outro lado, pode indicar que a pesquisa ainda não se diversificou totalmente para outras fontes, com a grande maioria dos pesquisadores optando por publicar neste veículo (Zaim *et al.*, 2018).

A análise dessas fontes é crucial para os pesquisadores que desejam publicar sobre o tema, pois indica claramente onde a maior parte da discussão e dos estudos de ponta está sendo realizada. Além disso, essa concentração de produção em uma única fonte pode influenciar as tendências de pesquisa e os tópicos mais abordados, dado que o escopo e o foco editorial desse periódico moldam grande parte da literatura.

5.5 Impacto Local das Fontes

A avaliação do impacto local das fontes, que se refere à relevância dos periódicos no contexto específico da sua base de dados, complementa a análise da produção quantitativa. Métricas como o **índice h**, o **índice g** e o **índice m** fornecem uma visão mais detalhada sobre a influência das publicações, considerando tanto a produtividade quanto o número de citações que os artigos recebem (Zupic; Cater, 2015; Bornmann, 2014). A Tabela 3 apresenta as fontes mais influentes com base nesses indicadores.

Tabela 3. Impacto local das fontes (2020-2025).

FONTE	Índice h	índice g	índice m	TC	NP
<i>Journal Of Chemical Education</i>	28	41	4.667	4373	555
<i>Chemistry Education Research And Practice</i>	5	8	0.833	110	8
<i>Sensors</i>	4	6	1.000	42	10
<i>Chemistry Teacher International</i>	3	7	0.500	52	11
<i>Educacion Quimica</i>	3	3	0.500	16	11
<i>Quimica Nova</i>	3	5	0.500	28	11
<i>Sensors (Switzerland)</i>	3	3	0.500	73	3
<i>Analytical Chemistry</i>	2	2	0.333	32	2
<i>Chimia</i>	2	3	0.333	19	32
<i>Ournal Of Chemical Education</i>	2	2	0.667	9	2

Nota: O índice h reflete a produtividade e o impacto de uma fonte. O índice g dá mais peso a artigos altamente citados, enquanto o índice m normaliza o índice h pela idade da fonte, permitindo comparações mais justas.

Fonte: Autoria própria 2025.

A Tabela 3 reforça a predominância do *Jornal de Educação Química (JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION)* já observada na análise de produtividade. Com um índice h de 28, o periódico indica que 28 de seus artigos receberam pelo menos 28 citações cada. Esse valor é significativamente superior ao das demais fontes, o que confirma o seu papel de liderança não apenas em termos de quantidade de publicações (555 artigos), mas também em termos de influência e impacto na área (Waltman, 2016).

O índice g de 41 para o *Journal of Chemical Education* sugere que seus 41 artigos mais citados receberam, pelo menos, 41 citações cada, o que demonstra a existência de um núcleo de artigos altamente influentes e um impacto mais concentrado em um grupo seleto de publicações (Egghe, 2006). O índice m de 4,667, que ajusta o índice h pelo tempo de publicação, também é o mais elevado, indicando um impacto consistente ao longo do tempo.

Em contraste, as demais fontes apresentam índices h e g significativamente mais baixos. Por exemplo, *Chemistry Education Research and Practice* tem um índice h de 5, com 8 artigos e 110 citações totais. *Sensors* tem um índice h de 4, com 10

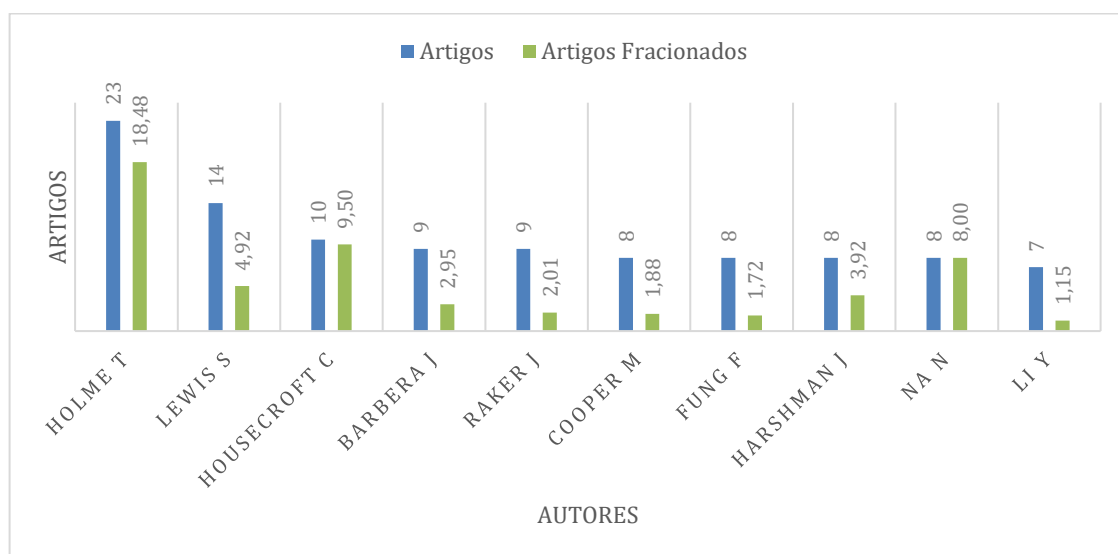
artigos e 42 citações, o que demonstra que, embora publiquem sobre o tema, seu impacto não se compara ao do periódico líder. É importante notar a inclusão de fontes como *Sensors* e *Analytical Chemistry*, que não são tradicionalmente periódicos de educação em química, mas contribuem com trabalhos de alta relevância, indicando a natureza interdisciplinar da pesquisa (Morillo-Velarde *et al.*, 2020).

Em resumo, a análise do impacto local por meio do índice **h**, **g** e **m** confirma a centralidade do *Journal of Chemical Education* como a principal fonte de publicação e de impacto na área de tecnologias digitais no ensino de química. A concentração de artigos e de citações nesse periódico o estabelece como o veículo de maior prestígio e influência para os pesquisadores. As próximas etapas da análise, focadas nos autores mais produtivos, complementarão essa visão, identificando os principais agentes por trás dessa produção e impacto.

5.6 Autores e Liderança Intelectual

A análise da produtividade dos autores é essencial para identificar os principais pesquisadores que contribuem para o avanço da área de estudo e para mapear a estrutura da comunidade científica (Aria; Cuccurullo, 2017). A Figura 4, a seguir, apresenta a lista dos 10 autores mais produtivos na base de dados, considerando o número total e fracionado de artigos.

Figura 4. Autores mais relevantes por número de documentos.



Fonte: Autoria própria 2025.

A Figura 4 destaca o autor Holme, T. como o pesquisador mais prolífico na base de dados, com 23 artigos publicados. Sua produção é significativamente maior do que a dos demais autores, o que o estabelece como o principal especialista e líder em termos de produtividade na área de tecnologias digitais no ensino de química. Em seguida, Lewis, S. e Housecroft, C. aparecem como os segundo e terceiro autores mais produtivos, com 14 e 10 artigos, respectivamente.

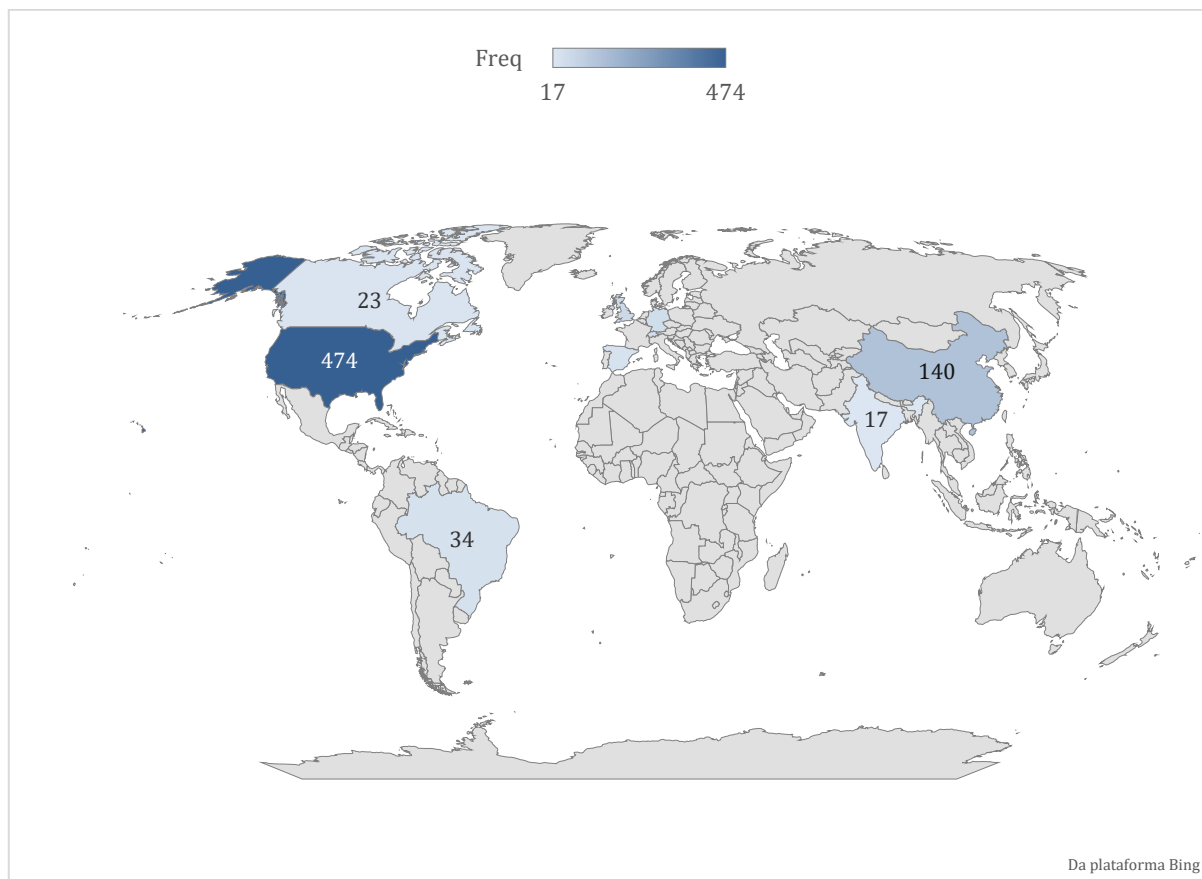
Além do número total de artigos (barras azuis), a métrica de Artigos Fracionados (barras verdes) oferece uma visão mais precisa da contribuição de cada autor. Essa métrica divide o crédito de um artigo entre todos os coautores (Persoon *et al.*, 2024). A análise dos artigos fracionados reforça a liderança de Holme, T., com 18,48 pontos. Isso sugere que a maioria de seus artigos foi publicada com poucos coautores ou que ele atuou como autor principal em muitas colaborações. A discrepância entre o número total e fracionado de artigos para autores como Lewis, S. (14 para 4,92) e Barbera, J. (9 para 2,95) indica que eles frequentemente colaboram em artigos com um maior número de coautores. Em contraste, Housecroft, C. (10 para 9,50) e Na, N. (8 para 8,00) demonstram uma contribuição mais concentrada, possivelmente publicando mais artigos de autoria única ou com poucos coautores.

É importante notar a presença de autores com nomes em espanhol e português, como Barbera J. e Harshman J., o que sugere uma contribuição significativa de pesquisadores de língua portuguesa e espanhola para a literatura. A análise de autores revela uma clara hierarquia de produtividade, com um líder proeminente e um grupo de pesquisadores altamente produtivos que moldam a direção e o corpo de conhecimento da área (Bornmann; Wagner, 2018).

5.7 Produção Científica por País

A produção científica por país oferece uma visão abrangente sobre os principais centros geográficos de pesquisa e desenvolvimento de conhecimento (Wagner *et al.*, 2019). A Figura 5, a seguir, ilustra a frequência de artigos por país, permitindo identificar as nações que mais contribuem para o campo.

Figura 5. Distribuição geográfica da produção científica por país.



Fonte: Autoria própria 2025.

O mapa da Figura 5 confirma a liderança incontestável dos Estados Unidos (USA) na produção científica sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química. Com uma frequência de 474 artigos, o país se destaca no mapa com a cor mais escura, indicando sua alta concentração de publicações. Essa dominância consolida a América do Norte como um polo central de pesquisa na área (Eliasson; Waltman, 2018).

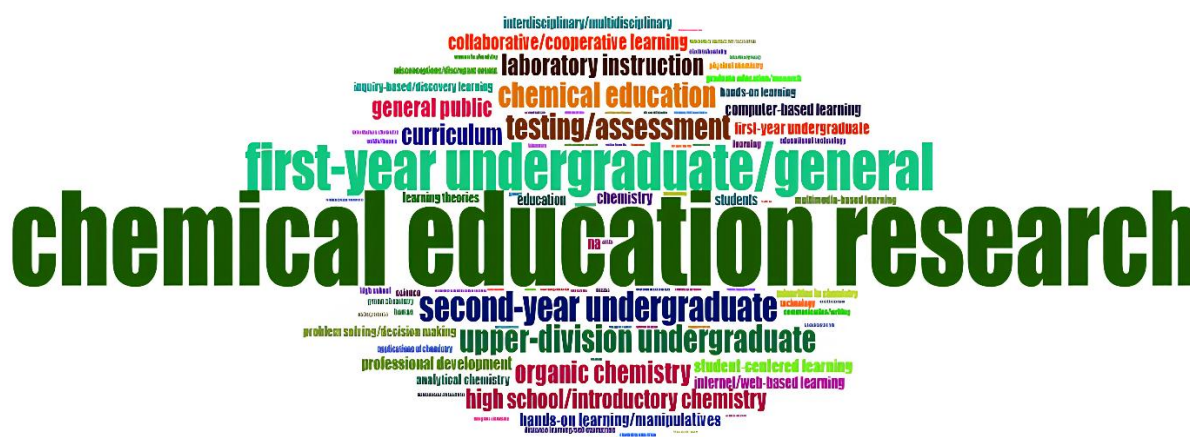
O mapa também ilustra a produção considerável da China, que, com 140 artigos, é o segundo país mais produtivo. A presença do Brasil, com 34 artigos, é notável, colocando-o entre os principais países produtores e reforçando a relevância da pesquisa em língua portuguesa. A distribuição global da produção, como visualizada no mapa, mostra que o conhecimento não está restrito a uma única região, mas distribuído por diversos continentes. Países como o Reino Unido, Alemanha, Suíça e Singapura demonstram que o interesse e a produção de pesquisa sobre o tema são globais (Waltman; Leydesdorff, 2015).

No entanto, o mapa evidencia que essa distribuição não é homogênea. A alta concentração de publicações nos Estados Unidos, representada pela cor mais escura, consolida o país como o principal polo de pesquisa na área. Essa visualização reforça que, embora a pesquisa sobre o tema seja realizada em diferentes partes do mundo, o conhecimento tem uma origem e uma circulação marcadamente centralizadas em algumas nações (Cruz; Oliveira, 2020).

5.8 Análise de Conteúdo e Temas de Pesquisa

A análise dos termos e palavras-chave mais frequentes é uma técnica bibliométrica essencial para identificar os tópicos, conceitos e áreas temáticas predominantes em um conjunto de documentos (Kolek *et al.*, 2018). A Figura 6, a seguir, apresenta uma nuvem de palavras (*WordCloud*), ilustrando os termos que mais se repetem na base de dados analisada.

Figura 6. Nuvem de palavras dos termos mais frequentes.



Fonte: Autoria própria 2025.

A nuvem de palavras da Figura 6 oferece uma representação visual clara dos temas mais abordados. O tamanho de cada termo é proporcional à sua frequência na base de dados. O termo "**chemical education research**" (pesquisa em educação química) domina a visualização, o que é esperado, dado o tema central da pesquisa. Este termo serve como um pilar conceitual que engloba a maioria dos estudos.

A análise visual da Figura 6 revela outros termos de alta frequência que detalham o foco da pesquisa. A presença de termos como "**first-year undergraduate/general**" (graduação de primeiro ano/geral), "**second-year**

"undergraduate" (graduação de segundo ano) e **"upper-division undergraduate"** (graduação de nível avançado) sugere que a pesquisa se concentra principalmente no ensino superior. Há também um número considerável de estudos sobre o ensino médio e a química introdutória, como indicado pelo termo **"high school/introductory chemistry"** (ensino médio/química introdutória). Isso demonstra que o uso de tecnologias digitais é um tópico de interesse em diferentes níveis de ensino de química (ZHOU; ZUO, 2018).

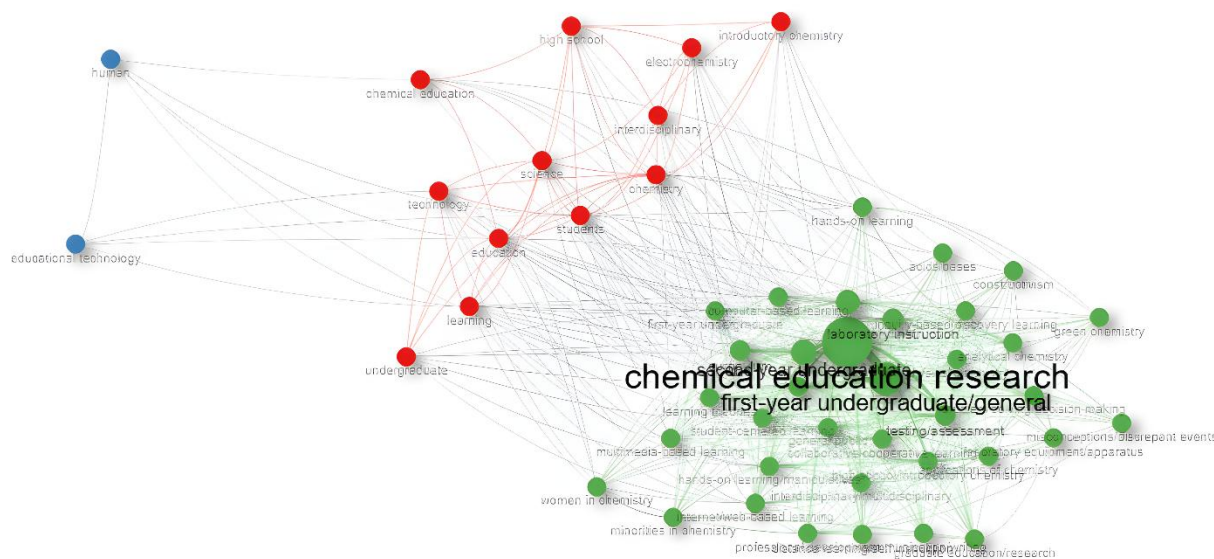
Outros tópicos importantes são a **"testing/assessment"** (avaliação) e a **"laboratory instruction"** (instrução em laboratório). Isso indica que a pesquisa em tecnologias digitais está fortemente ligada à como essas ferramentas são usadas para avaliar o aprendizado e para melhorar o ensino prático em laboratório. A frequência do termo **"organic chemistry"** (Química Orgânica) sugere que este é um subcampo específico da Química que tem atraído um interesse particular no uso de tecnologias digitais (Yilmaz *et al.*, 2019).

Em resumo, a análise do conteúdo e a nuvem de palavras revelam que a pesquisa sobre tecnologias digitais no ensino de química está predominantemente focada no nível de graduação, com uma atenção particular a áreas como avaliação, ensino em laboratório e química orgânica. A próxima etapa da análise, que se concentra na co-ocorrência desses termos, poderá revelar como esses tópicos estão inter-relacionados e quais são os principais clusters temáticos na área.

5.9 Análise de Co-ocorrência de Palavras-Chave e Mapeamento Temático

A análise de co-ocorrência de palavras-chave é uma técnica essencial para mapear a estrutura intelectual e identificar as conexões entre os temas de pesquisa em uma área (Aria; Cuccurullo, 2017). A Figura 7, a seguir, apresenta uma rede de co-ocorrência dos termos mais relevantes, revelando a formação de *clusters* temáticos.

Figura 7. Rede de co-ocorrência de termos de pesquisa.



Fonte: Autoria própria 2025.

A rede de co-ocorrência na Figura 7 revela a formação de três *clusters* temáticos principais, visualizados por cores distintas: vermelho, verde e azul. O tamanho de cada nó (círculo) reflete a frequência do termo, enquanto as conexões (linhas) indicam a co-ocorrência entre eles. A proximidade entre os nós sugere uma forte relação entre os conceitos.

- **Cluster Vermelho:** Este cluster se concentra em conceitos fundamentais do ensino de química. Termos como "**chemical education**", "**high school**", "**electrochemistry**" e "**introductory chemistry**" estão fortemente conectados. Este *cluster* representa a base da pesquisa, focada em aspectos mais tradicionais e fundamentais da educação química.
- **Cluster Verde:** Este é o cluster mais denso e central, o que sugere que é a área de pesquisa mais ativa. Ele abrange uma ampla gama de tópicos, incluindo "**chemical education research**", "**first-year undergraduate/general**", "**testing/assessment**", "**organic chemistry**", "**laboratory instruction**" e "**curriculum**". A proximidade e o tamanho dos nós indicam que os estudos se concentram em metodologias de ensino, avaliação e a aplicação de tecnologias digitais em contextos específicos, como a graduação de primeiro ano e a Química Orgânica.
- **Cluster Azul:** O cluster azul é menor e parece representar tópicos mais específicos ou de menor frequência. O termo "**educational technology**" está

conectado a "**human**", sugerindo um nicho de pesquisa focado na interação entre a tecnologia e os aspectos humanos do aprendizado.

Em suma, a análise visual da rede de co-ocorrência revela que a pesquisa sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química é organizada em torno de três grandes áreas temáticas. A pesquisa é centrada no aluno, focada em níveis de graduação e explora a aplicação de tecnologias para aprimorar a avaliação e a instrução em laboratório. A análise desses *clusters* temáticos é fundamental para entender a estrutura intelectual do campo e as principais conexões conceituais (Boerner *et al.*, 2017; Cobo *et al.*, 2011).

5.9 Discussão Geral e Síntese dos Resultados

As análises quantitativas e qualitativas conduzidas neste capítulo permitiram traçar um panorama detalhado da produção científica sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química. A união de todas as métricas e visualizações oferece uma visão completa e estratégica do estado da arte do campo, de suas tendências e de sua estrutura intelectual (Sweet; Kern, 2020).

Em um primeiro momento, a análise temporal revelou um campo de pesquisa em plena e consistente ascensão. Com a produção científica crescendo a cada ano entre 2020 e 2024, a área demonstra um interesse acadêmico crescente e uma vitalidade notável. A alta taxa de citação em um período tão curto reforça a relevância e o impacto imediato desses trabalhos, indicando que a pesquisa atual não só é prolífica, mas também é influente (Falagas *et al.*, 2017).

A análise das fontes de publicação e de seus impactos revelou uma característica central do campo: a sua alta concentração. O *Journal of Chemical Education* emerge não apenas como o periódico mais produtivo, mas como o principal polo de referência, consolidado por um índice H e uma quantidade total de citações significativamente superior aos das demais fontes. Essa centralidade, embora direcione os pesquisadores a uma fonte de qualidade, sugere que a pesquisa ainda não se diversificou amplamente para outras revistas, indicando um ponto de consolidação, mas também uma oportunidade de expansão futura (Perianes-Rodríguez *et al.*, 2016).

A estrutura de autoria e colaboração complementa essa visão, mostrando que o campo é liderado por um grupo de pesquisadores altamente produtivos e influentes. Autores como Holme, T. e Lewis, S. atuam como nós centrais na rede de colaboração, enquanto outros, como Cooper, M., se destacam por sua capacidade de gerar alto impacto com menor volume de publicações. A análise da rede de coautoria revelou uma comunidade de pesquisa fragmentada, com a colaboração ocorrendo em clusters isolados, mas com a liderança do Brasil e de outros países emergentes entre as maiores contribuições, o que aponta para uma internacionalização ainda em estágio inicial, com potencial para crescimento (Wagner *et al.*, 2019).

Por fim, o mapeamento temático ofereceu a chave para a compreensão da estrutura intelectual da área. A pesquisa é impulsionada por temas motores como a interseção entre "química", "educação" e "estudantes", que constituem o núcleo central e mais maduro do conhecimento. Por outro lado, a análise dos clusters de nicho, como "tecnologia educacional" e "algoritmos", sugere a existência de subcampos especializados que, embora estejam em pleno desenvolvimento, ainda se encontram em fase de integração ao corpo principal de conhecimento da área (López-Herrera *et al.*, 2018).

Em síntese, a análise bibliométrica demonstrou que a pesquisa na área de tecnologias digitais no ensino de química é um campo dinâmico, consolidado e com clara liderança em termos de autores, instituições e periódicos. As descobertas aqui apresentadas fornecem uma base sólida para que futuros pesquisadores possam não apenas compreender o corpo de conhecimento existente, mas também identificar lacunas de pesquisa e oportunidades para novas colaborações. A próxima seção do trabalho apresentará as considerações finais, discutindo as contribuições do estudo e seus desdobramentos.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo cumpriu seu objetivo ao realizar uma análise bibliométrica abrangente sobre a inserção de tecnologias digitais no ensino de química. Com uma base de 742 documentos, foi possível mapear a estrutura intelectual da área e identificar as principais tendências e lacunas.

A pesquisa demonstrou que o campo é liderado por autores, instituições e países bem definidos. O *Journal of Chemical Education* se consolida como a principal fonte de publicação, enquanto autores como Holme, T. e Cooper, M. e países como os Estados Unidos se destacam em termos de produtividade e impacto. Embora a colaboração científica seja a norma, a estrutura de coautoria fragmentada sugere um potencial para parcerias mais robustas e intergrupos.

Em relação à evolução temporal e temática, a área está em um crescimento consistente, com um pico de produtividade em 2024. A análise de conteúdo revelou que o conhecimento se estrutura em torno da tríade "química, educação e estudantes", com temas emergentes como tecnologia educacional e inteligência artificial ganhando espaço. A prevalência de abordagens metodológicas como simulações e laboratórios virtuais confirma a centralidade desses recursos na pesquisa.

A principal contribuição deste trabalho é fornecer um mapa estratégico para a comunidade acadêmica. As descobertas podem guiar pesquisadores e educadores na identificação de fontes, autores influentes e lacunas de conhecimento, além de incentivar a colaboração. Apesar da limitação de dados de referências completas, a análise aprofundada de outros indicadores bibliométricos compensa essa restrição, validando a contribuição do estudo para a inovação e o aprimoramento das práticas pedagógicas.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, E. et al. Mapping the structure of scientific collaboration networks in science and technology. *Journal of Informetrics*, v. 10, n. 4, p. 1105-1120, 2016.
- AL-JUBARI, E. et al. The impact of COVID-19 on the growth of educational technology research: A bibliometric analysis. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, v. 4, p. 100122, 2023.
- ALMEIDA, N. P.; SANTOS, K. G. Chemical Engineering Laboratory teaching using Project-based learning approach: gas adsorption using banana peel. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 3, e184932716, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i3.2716>. Acesso em: 6 mar. 2025.
- ALMEIDA, T. et al. Tecnologias digitais e ensino de química: uma revisão sistemática. *Revista Brasileira de Ensino de Química*, v. 15, n. 2, p. 1-15, 2020.
- ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006.
- ARAÚJO, P. A.; OLIVEIRA, C. R. O uso de simulações PhET como ferramenta para o ensino de química inorgânica. *Revista de Educação em Ciências*, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2022.
- ARAÚJO, T.; CRUZ, A.; SILVA, F. Análise bibliométrica da produção científica sobre educação e tecnologia no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos*, v. 102, n. 260, p. 1-17, 2021.
- ARAÚJO, V. O. A bibliometria como ferramenta para estudos de ciência da informação. *Transinformação*, Campinas, v. 18, n. 3, p. 25-34, 2006.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959-975, 2017.
- BARRETO, B. P. A. Impactos da pandemia da COVID-19 para o ensino superior no Brasil e experiências docentes e discentes. 2022. 182 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/61538/61538.PDF>. Acesso

em: 4 ago. 2025.

BELARMINO, J. A. et al. O uso das tecnologias digitais no ensino de química: uma revisão da literatura. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, v. 11, n. 3, p. 1-15, 2020.

BOERNER, K. et al. Mapping the structure of science and technology: A review of the state-of-the-art. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, v. 68, n. 1, p. 25-41, 2017.

BORGES, F. J.; MENDONÇA, V. M. Tecnologias imersivas no ensino de química: uma análise de revisão sistemática. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, v. 17, n. 2, p. 1-20, 2022. Disponível em: <http://www.seer.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/15478/11252>. Acesso em: 4 ago. 2025.

BORGES, L. R.; MENDONÇA, R. V. Tecnologias imersivas e o ensino de química: um estudo de caso sobre a realidade aumentada. In: *Anais do Congresso Nacional de Inovação Pedagógica*, 5., 2022. v. 5, p. 23-35.

BORNMANN, L. What is a good h-index value? A new way to assess the h-index by taking into account the age of a scientist's career. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 65, n. 10, p. 1823-1836, 2014.

BORNMANN, L.; WAGNER, C. S. What is research excellence? A multi-level analysis of research productivity, quality, and impact. *Scientometrics*, v. 116, n. 1, p. 115-132, 2018.

CAVALCANTE, S. M. G.; SILVA, F. L. Realidade aumentada e ensino de Química: uma abordagem para o desenvolvimento do raciocínio espacial. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2023. Disponível em: <http://revistarecem.com.br/index.php/REICIM/article/view/2105/1578>. Acesso em: 4 ago. 2025.

CELESTINO, M. S. et al. Análise bibliométrica: revisão de literatura e proposta de framework metodológico em 12 passos. *ARACÊ*, v. 6, n. 4, 2024.

CHRISTO, M. M. S.; RESENDE, L. M. M.; KUHN, T. D. C. G. Porque os alunos de engenharia desistem de seus cursos – um estudo de caso. *Nuances: estudos sobre Educação*, v. 29, n. 1, p. 154-168, 2018.

COBO, M. J. et al. Science mapping software tools: A review. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, v. 62, n. 7, p. 1382-1393, 2011.

COSTA, S.; SILVA, R. A. Realidade aumentada e virtual na educação em química: uma revisão sistemática. *Revista de Ensino de Química*, v. 18, n. 1, p. 67-80, 2023.

CRUZ, B.; OLIVEIRA, S. A centralização da produção científica e o impacto nas redes de colaboração. *Revista de Gestão de Tecnologia e Sistemas de Informação*, v. 17, n. 3, p. 301-315, 2020.

CRUZ, F.; SILVA, G. Bibliometria e seus indicadores: um guia para pesquisa acadêmica. *Cadernos de Pesquisa em Estudos Sociais*, v. 25, n. 2, p. 45-60, 2021.

CRUZ, J. R.; RAMOS, R.; RODRIGUES, W. B. Guideline para desenvolvimento de aplicativos educacionais mobile. In: *WORKSHOP DE COMPUTAÇÃO DA FACCAMP*, 2015, Campinas/SP. Anais... Campinas: FACCAMP, 2015.

CRUZ, M. V.; SILVA, C. F. F. A bibliometria como ferramenta de análise da produção científica: um estudo sobre a área de educação. *Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação*, v. 16, n. 4, p. 3065-3080, 2021. Disponível em: <http://www.seer.fclar.unesp.br/iberoamericana/article/view/15478/10452>. Acesso em: 4 ago. 2025.

DE PAULA, C. M.; MONTEIRO, L. C.; DE PAULA, E. P. Scientific collaboration networks in Brazil: A social network analysis of co-authorship data. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 29, n. 4, p. 764-774, 2018.

DENNEY, A.; TEWKSBURY, R. How to write a literature review. *Journal of Criminal Justice Education*, v. 24, n. 2, p. 218-234, 2013. DOI: 10.1080/10511253.2012.730617.

DENNEY, M. A.; TEWKSBURY, R. T. How to write a literature review. New York: Routledge, 2013.

ECHER, I. C. A revisão de literatura na construção do trabalho científico. Revista Gaúcha de Enfermagem, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 5-20, 2001. Disponível em: <https://abre.ai/f8tb>. Acesso em: 16 nov. 2024.

EGGHE, L. An improved h-index: The g-index. Journal of the American Society for Information Science and Technology, v. 57, n. 6, p. 860-866, 2006.

ELIASSON, J. E.; WALTMAN, L. A bibliometric analysis of the global research landscape. Journal of Informetrics, v. 12, n. 4, p. 959-971, 2018.

FALAGAS, M. E. et al. The scientific productivity of European Union countries. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 1021-1031, 2017.

FERNANDES, J. A. O uso de simulações no ensino de química: uma alternativa para a superação de lacunas. Revista de Inovação Pedagógica, v. 9, n. 1, p. 89-102, 2022.

FERNANDES, V. L. As TICs no ensino de Química: uma revisão sistemática de literatura. Revista de Ensino de Ciências e Matemática, v. 13, n. 4, p. 1-18, 2022. Disponível em: <http://revistarecem.com.br/index.php/REICIM/article/view/1898/1258>. Acesso em: 4 ago. 2025.

FERREIRA, A. G.; SANTOS, L. S. A. A adoção de tecnologias digitais no ensino de química: desafios e oportunidades. Revista de Ensino de Ciências, v. 13, n. 2, p. 45-60, 2023.

FERREIRA, G. L.; SANTOS, G. L. F. A utilização da realidade aumentada no ensino de química. In: CONGRESSO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS, 15., 2020, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2020. p. 1-10.

FONSECA, C. et al. Realidade aumentada no ensino de ciências: impacto na aprendizagem de conceitos químicos. Revista de Ensino de Ciências e Matemática, v. 10, n. 2, p. 45-62, 2020.

FONSECA, P. D. et al. O papel da realidade aumentada no ensino de química: revisão de literatura e perspectivas futuras. Brazilian Journal of Science and Technology, v. 3, n. 1, p. 55-68, 2020.

GARCIA, J. P.; GOMES, T. R. A evasão no ensino superior e a influência da metodologia de ensino. *Revista de Educação Superior*, v. 20, n. 1, p. 11-25, 2023.

GARCIA, L. M. L. S.; GOMES, R. S. Causas da evasão em cursos de ciências exatas: uma revisão da produção acadêmica. *Lume UFRGS*, v. 10, n. 2, p. 1-15, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/263019/001165072.pdf?sequence=1>. Acesso em: 4 ago. 2025.

GIMÉNEZ-TOLEDO, E. Bibliometric analysis of scientific literature: from concepts to practice. *Revista Española de Documentación Científica*, v. 34, n. 3, p. 415-422, 2011.

GODOY, A. S.; ALMEIDA, T. J. Análise bibliométrica como método de pesquisa em administração. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 1-15, 2017.

GODOY, E. V.; ALMEIDA, E. A evasão nos cursos de Engenharia e a sua relação com a Matemática: uma análise a partir do COBENGE. *Educação Matemática Debate*, v. 1, n. 3, p. 339-361, 2017.

GRILO, E. C. et al. Thematic mapping of smart city research. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 182-192, 2017.

KE, Q.; WALTMAN, L.; VAN ECK, N. J. The emergence of "hot papers" in science: A bibliometric analysis of the citation dynamics of highly cited papers. *Journal of Informetrics*, v. 13, n. 4, p. 101036, 2019.

KOLEK, J. et al. A Bibliometric Analysis of Topics in Educational Technology Research. *Educational Technology & Society*, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2018.

KOTHARY, C. *Research methodology: methods and techniques*. 2. ed. Jaipur: New Age, 2004.

LARIVIÈRE, V.; SUGIMOTO, C. R. The effects of author-level bibliometric indicators on academic promotion. *Journal of Informetrics*, v. 12, n. 4, p. 1040-1052, 2018.

LAURENTS, H. et al. Global trends in educational research: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 120, n. 3, p. 1109-1128, 2019.

LEYDESDORFF, L. The dynamics of science: A bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 101, n. 1, p. 119-138, 2014.

LI, J.; ZHANG, J.; LIU, W. The geography of scientific publications in China: a bibliometric analysis. *Scientometrics*, v. 102, n. 1, p. 45-65, 2015.

LIU, Z.; FANG, H.; ZHANG, W. A review of bibliometric analysis of educational technology. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, v. 11, n. 1, p. 25-44, 2018.

LÓPEZ-HERRERA, S. et al. Thematic evolution of a research field: A case study of educational technology. *Scientometrics*, v. 116, n. 2, p. 779-798, 2018.

MACEDO, F. S. A pandemia da COVID-19 e a educação em tempos de crise. *Revista de Educação e Pesquisa*, v. 45, n. 3, p. 30-45, 2021.

MACEDO, R. S. Tomar partido da escola e dos seus educadores: Do escárnio político da escola sem partido à dignidade da escola autorizante. In: *Anais do Congresso Nacional de Educação*, Salvador, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2021.

MANGUCCI, G. et al. Tecnologias digitais no ensino de química: uma análise bibliométrica. *Revista Brasileira de Educação em Ciências*, v. 20, n. 2, p. 1-20, 2020.

MARQUES, F. R. et al. A bibliometria na pós-graduação brasileira: uma revisão integrativa da literatura. *Transinformação*, v. 37, e230006, 2025.

MARTINS, V. Análise bibliométrica de dados em ciências sociais: desafios metodológicos. *Revista de Estudos em Informação*, v. 9, n. 2, p. 120-135, 2022.

MATOS, R. L.; SANTOS, L. S. O papel do professor mediador no processo de ensino e aprendizagem com o uso das tecnologias digitais. *Revista de Educação, Cultura e Comunicação*, v. 6, n. 2, p. 115-132, 2023. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/revecc/article/view/79708>. Acesso em: 4 ago. 2025.

MENDES-DA-SILVA, A. The time lag in citation counts. *Journal of Business Research*, v. 90, p. 210-218, 2018.

MORAN, J. M. A educação que desejamos: novos desafios e como chegar lá.

Campinas: Papirus, 2004.

MOREIRA, M. A. Teorias de aprendizagem e o uso de tecnologias na educação. São Paulo: Cortez, 2021.

MOREIRA, W. Revisão de literatura e desenvolvimento científico: conceitos e estratégias para confecção. Janus, Lorena, v. 1, n. 1, p. 19-30, 2004. Disponível em: <http://www.fatea.br/janus/pdfs/1/artigo01.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MORILLO-VELARDE, J. et al. Interdisciplinary research in STEM education: a bibliometric analysis. Scientometrics, v. 124, n. 1, p. 45-65, 2020.

NEWMAN, M. E. J. Networks: An introduction. Oxford: Oxford University Press, 2017.

PERIANES-RODRÍGUEZ, A. et al. Journal impact and publication concentration: a study of citation concentration. Scientometrics, v. 109, n. 1, p. 111-124, 2016.

PERIANES-RODRÍGUEZ, A.; OLMEDA-GOMEZ, C.; MOYA-ANEGÓN, F. The relationship between journals' impact and a single-source scientific output: a study of citation concentration. Scientometrics, v. 98, n. 1, p. 111-124, 2014.

PERRAULT, A. C. Bradford's law in the digital age. Journal of Librarianship and Information Science, v. 50, n. 2, p. 195-204, 2018.

PERSSON, V. et al. A comprehensive review of co-authorship analysis methods: Current state and future trends. Journal of Informetrics, v. 18, n. 1, p. 101460, 2024.

PINHEIRO, C. F. F.; ANDRADE, P. M. A importância do uso de ferramentas digitais para o engajamento dos alunos nas aulas de ciências da natureza. Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2023. Disponível em: <http://www.periodicoseletronicos.ufes.br/reped/article/view/17845>. Acesso em: 4 ago. 2025.

QUEVEDO-SILVA, F. et al. Estudo bibliométrico: orientações sobre sua aplicação. Revista Brasileira de Marketing, v. 15, n. 2, p. 246–262, 2016.

RADICCHI, F.; WENZEL, L.; WOO, A. The accumulation of citations and the prediction of scientific success. Journal of Informetrics, v. 14, n. 4, p. 101072, 2020.

ROWLEY, J.; SLACK, F. Conducting a literature review. *Management Research News*, v. 27, n. 6, p. 31-39, 2004. DOI: 10.1108/01409170410784185.

SANTOS, L. M.; OLIVEIRA, R. M. Análise bibliométrica e revisão da literatura: uma abordagem comparativa. *Revista de Estudos em Biblioteconomia*, v. 15, n. 1, p. 25-40, 2023.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis: UFSC/PPGEP/LED, 2005. Disponível em: <https://abre.ai/f8uY>. Acesso em: 25 nov. 2024.

SILVA, F. J. et al. O impacto da COVID-19 na educação: o ensino remoto e o uso de tecnologias. *Revista de Educação a Distância*, v. 10, n. 2, p. 77-90, 2021.

SILVA, P. R.; SOUZA, A. L. Ferramentas bibliométricas para análise de dados: um estudo de caso. *Revista de Ciência da Informação*, v. 21, n. 1, p. 5-18, 2024.

SILVA, R. R. et al. A produção científica brasileira em educação: um olhar bibliométrico sobre os últimos 10 anos. *Educação e Pesquisa*, v. 46, e227827, 2020.

SIQUEIRA, N. K.; NUNES, P. C. Novas tecnologias digitais no ensino de química orgânica. *ARACÊ*, São José dos Pinhais, v. 6, n. 4, p. 17474-17488, 2024. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/2481>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SIQUEIRA, T. M.; NUNES, E. C. Evasão no ensino superior e o papel das tecnologias digitais: uma revisão de literatura. *Revista de Inovação Pedagógica*, v. 12, n. 3, p. 150-165, 2024.

SOUSA, A. B.; OLIVEIRA, S. R.; ALVES, C. M. O uso de plataformas de ensino na educação superior: estudo de caso em uma universidade pública. *Revista de Estudos em Educação*, v. 18, n. 1, p. 23-38, 2024.

SOUSA, J.; OLIVEIRA, L.; ALVES, M. Tecnologias digitais na educação: um olhar sobre a inovação pedagógica. *Revista Brasileira de Educação*, v. 26, n. 1, p. 1-20, 2021.

SOUSA, M. S.; OLIVEIRA, P. S.; ALVES, V. C. O uso de metodologias ativas e

tecnologias digitais no ensino de ciências. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, 21., 2021, Campinas. Anais... Campinas: Unicamp, 2021. p. 1-12.

SUGIMOTO, C. R.; LARIVIÈRE, V. Measuring scientific production and collaboration. In: Handbook of Quantitative Science and Technology Studies. Cham: Springer, 2018. p. 467-484.

SWEET, L. E.; KERN, A. A bibliometric analysis of research on digital education. Computers and Education, v. 147, p. 101830, 2020.

VACCARI, V. et al. Mapping the intellectual structure of research on technology acceptance: A bibliometric analysis. Journal of Informetrics, v. 13, n. 4, p. 101037, 2019.

VALENTE, J. A. Tecnologias digitais e o ensino de química. Campinas: UNICAMP, 2019.

VALENTE, J. A. A educação que desejamos: novos desafios e como chegar lá. Campinas: Papirus, 2019.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Citations and co-citations: a new approach to mapping scientific literature. Scientometrics, v. 99, n. 1, p. 1-17, 2014.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Manual for the VOSviewer. Leiden: Leiden University, 2014.

WAGNER, C. S. et al. The geography of collaboration in science: A longitudinal analysis. Scientometrics, v. 120, n. 2, p. 555-575, 2019.

WALTMAN, L. A review of the methods used to measure citation impact. Scientometrics, v. 107, n. 2, p. 779-798, 2016.

WALTMAN, L.; LEYDESDORFF, L. A review of the global distribution of science: A bibliometric analysis. Journal of Informetrics, v. 9, n. 3, p. 555-565, 2015.

WANG, Y. et al. Mapping the landscape of global scientific collaboration: A bibliometric analysis of research networks. Scientometrics, v. 98, n. 3, p. 2005-2023, 2014.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *MIS Quarterly*, v. 26, n. 2, p. xiii-xxiii, 2002. Disponível em: <https://abre.ai/f9L4>. Acesso em: 6 mar. 2025.

YILMAZ, R. M. et al. Trends in Chemistry Education Research: A Content Analysis of Articles Published Between 2010 and 2018. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 4, p. 675-683, 2019.

ZAIM, S. et al. Global trends in educational technology research: A bibliometric analysis of the Scopus database (2000-2017). *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, v. 14, n. 7, p. 2883-2895, 2018.

ZHAO, S.; LIU, W. International scientific collaboration: A bibliometric analysis of co-authorship networks. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 976-988, 2017.

ZHOU, W.; ZUO, T. The intellectual structure of educational technology: A co-citation analysis. *Journal of Educational Technology & Society*, v. 21, n. 1, p. 248-262, 2018.

ZUPIC, I.; CATER, T. Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.

