ISSN: 2358-8829

O USO DE SIMULAÇÕES NO ENSINO DA BIOLOGIA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM PERIÓDICOS CIENTÍFICOS

Andreza Cristiana da Silva Pedroso [1]
Joethe Moraes de Carvalho [2]
José Francisco de Magalhães Netto [3]

INTRODUÇÃO

O ensino de Ciências na educação básica, especialmente no Ensino Médio, enfrenta desafios persistentes para promover uma aprendizagem que transcenda a memorização e alcance a significatividade. Em muitas escolas brasileiras, ainda prevalece uma abordagem tradicional centrada na transmissão direta de conteúdos, posicionando o estudante como um receptor passivo. Fracalanza (1986) e Paiva et al. (2016), apontam que essa abordagem tradicional se limita à mera transmissão de conteúdos, sem promover a formação de estudantes críticos e reflexivos. Nessa perspectiva, o conhecimento científico tende a ser apresentado de forma desarticulada da realidade do estudante, dificultando a atribuição de significado aos conteúdos e comprometendo o desenvolvimento das competências digitais e científicas preconizadas pelas normativas educacionais contemporâneas.

Nesse cenário, o ensino de biologia demanda estratégias didáticas diferenciadas, principalmente por abordar fenômenos que se estendem do nível microscópico ao macroscópico, o que frequentemente confere um caráter abstrato aos conteúdos. De acordo com Cassanti et al. (2008), essa abstração, associada à predominância de abordagens teóricas, dificulta o processo de aprendizagem e contribui para o desinteresse dos estudantes. Além disso, a dificuldade de visualizar esses fenômenos em tempo real, aliada à limitada infraestrutura laboratorial disponível em muitas instituições de ensino,

[1] Mestranda do Curso de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM) da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, andreza.pedroso@ufam.edu.br;
[2] Doutorando pelo Curso de Pós-Graduação em Informática da UFAM, joethe@hotmail.com;
[3] Professor Orientador, Doutor do Curso de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM) da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, jnetto@icomp.ufam.edu.br;

intensifica esse cenário, comprometendo a compreensão da complexidade dos processos biológicos.

Diante dos desafios relacionados à visualização desses processos biológicos complexos e das limitações impostas pela infraestrutura laboratorial, a mediação tecnológica fundamentada na simulação computacional, configura-se como uma estratégia promissora para o atendimento às diretrizes da BNCC Computação, que incentiva o desenvolvimento do pensamento computacional e a compreensão de modelos do mundo real através de sistemas digitais (BRASIL, 2022).

Diante da relevância de analisar o uso das tecnologias no ensino de Ciências, buscou-se como objetivo mapear os tipos de simulações digitais aplicadas ao ensino de Biologia e, com isso, compreender as abordagens pedagógicas adotadas, os recursos tecnológicos empregados, o público-alvo contemplado e as áreas da Biologia mais abordadas.

Para tanto, este artigo está estruturado em cinco seções. A primeira contextualiza o cenário do ensino de Biologia e sua interface com a BNCC Computação. A segunda apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o levantamento e análise dos trabalhos. A terceira e a quarta seções expõem e discutem os resultados, respectivamente. Por fim, a quinta seção reúne as considerações finais e conclusões do estudo.

PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Esta pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivos descritivos. No que tange aos procedimentos técnicos adotados, trata-se de uma pesquisa bibliográfica desenvolvida por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Segundo Kitchenham e Charters (2007), a RSL constitui “um meio de identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis relevantes para uma determinada questão de pesquisa, área temática ou fenômeno de interesse”. Nesse contexto, a presente revisão tem como objetivo mapear os tipos de simulações digitais utilizadas para o ensino de biologia na Educação básica, identificando os conteúdos curriculares abordados no Ensino Médio.

Para conduzir a revisão, foi adotado o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), amplamente utilizado para assegurar rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade em estudos de revisão. O protocolo

orienta a descrição dos critérios, métodos e resultados do processo de seleção dos estudos, por meio da aplicação de checklist e da utilização de um fluxograma que documentam as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão das publicações analisadas (Page et al., 2021).

A partir do objetivo proposto, foram definidas as questões de pesquisa que nortearam a condução da revisão sistemática, apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1. Questões de pesquisa

	Questões de Pesquisa
Q1	Quais são as naturezas pedagógicas das simulações predominantemente utilizadas?
Q2	Quais áreas temáticas da Biologia são frequentemente abordadas por meio de simulações?
Q3	Quais recursos tecnológicos sustentam essas simulações?
Q4	Para quais perfis de estudantes as intervenções com simulações estão sendo desenhadas?

Fonte: Elaborado pelos autores

A busca dos estudos foi realizada na Biblioteca Digital da Sociedade Brasileira de Computação (SBC), no Portal Periódicos CAPES e na Web of Science. A query de busca foi elaborada a partir da combinação de termos relacionados às simulações e ao ensino de Biologia. Para ampliar a recuperação de estudos relevantes, foram utilizados descritores em português e inglês, agrupados por categorias temáticas. Os termos pertencentes à mesma categoria foram agrupados por meio do operador booleano OR, enquanto o cruzamento entre categorias distintas foi realizado com o operador AND. Além disso, a busca foi delimitada no período compreendido entre 2016 e 2026.

Devido às particularidades de indexação e aos mecanismos de pesquisa de cada base de dados, as expressões de buscas foram adaptadas de forma específicas. Na Biblioteca Digital da SBPC, adotou-se uma string ampliada com variados descritores para contemplar a diversidade terminológica da literatura na área da Informática da Educação. Já nas demais bases consultadas (Web of Science e CAPES) utilizou-se descritores sintéticos para evitar a exclusão de artigos.

Ademais, as buscas foram restritas ao campo Título (Title) para assegurar precisão e filtrar pesquisas em que o uso educacional da simulação representa o objeto central da investigação. Essa escolha metodológica pautou-se na busca por alta precisão, evitando a recuperação, apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Estratégias de busca utilizadas nas bases de dados

Base de dados	Estratégia de busca
Biblioteca Digital da Sociedade Brasileira de Computação	(simulação OR "simulação computacional" OR "laboratório virtual" OR "software educativo" OR simulation OR "virtual lab") AND ("ensino de biologia" OR "ciências biológicas" OR "biology teaching")
Web of Science	(Simulation OR "virtual lab") AND ("biology teaching")
Portal Periódicos CAPES	simulation AND biology AND teaching

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir da definição das estratégias de busca, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão para refinar a seleção dos estudos e garantir a aderência ao escopo da pesquisa, conforme Quadro 3.

Quadro 3. Critérios de Inclusão e Exclusão

Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
CI1 - Estudos que abordam simulação e ensino de biologia; CI2 - Estudos Publicados a partir de 2016.	CE1 - Estudos irrelevantes para as perguntas de pesquisa; CE2 - Estudos que não abordam a temática da pesquisa; CE3 - Teses, dissertações, relatórios, livros e normas.

Fonte: Elaborado pelos autores

Os critérios adotados de inclusão abordam artigos que utilizam simulações computacionais, virtuais ou laboratoriais aplicadas a contextos educativos no ensino de Biologia (CI1) e a produção científica recente, fixada entre 2016 e 2026 (CI2). Em contrapartida, os critérios de exclusão contemplam trabalhos que, embora estabeleçam relações entre tecnologia e Biologia, não apresentem foco pedagógico nem intencionalidade educativa no processo de ensino-aprendizagem (CE1), pesquisas que não abordem o uso de simulações computacionais, virtuais ou laboratoriais especificamente voltadas à Educação ou ao Ensino de Biologia (CE2) e produções que não se caracterizem como artigos científicos publicados em periódicos, tais como teses, dissertações, relatórios técnicos, livros e documentos normativos, priorizando-se, assim, a artigos publicados em periódicos com revisão por pares (CE3).

ISSN: 2358-8829

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca nas bases de dados foi realizada inicialmente em 25 de abril de 2026, resultando na identificação inicial de 192 documentos, sendo 01 proveniente da Biblioteca Digital da Sociedade Brasileira de Computação, 182 da Web of Science e 09 do Portal de Periódicos CAPES. Após a aplicação do recorte temporal estabelecido para o período de 2016-2026, foram removidos 05 estudos.

Na etapa de triagem, realizada por meio da leitura dos títulos e resumos, foram removidos 165 trabalhos que não apresentaram aderência à temática da pesquisa. Dessa forma, 22 documentos foram selecionados para a etapa da leitura integral e avaliação da elegibilidade.

Após a análise completa dos textos, 10 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios definidos para a revisão, sendo 05 por indisponibilidade do texto completo através da rede CAFe, resultando na seleção final de 12 documentos. O resultado de cada etapa do protocolo está detalhado na Figura 1.

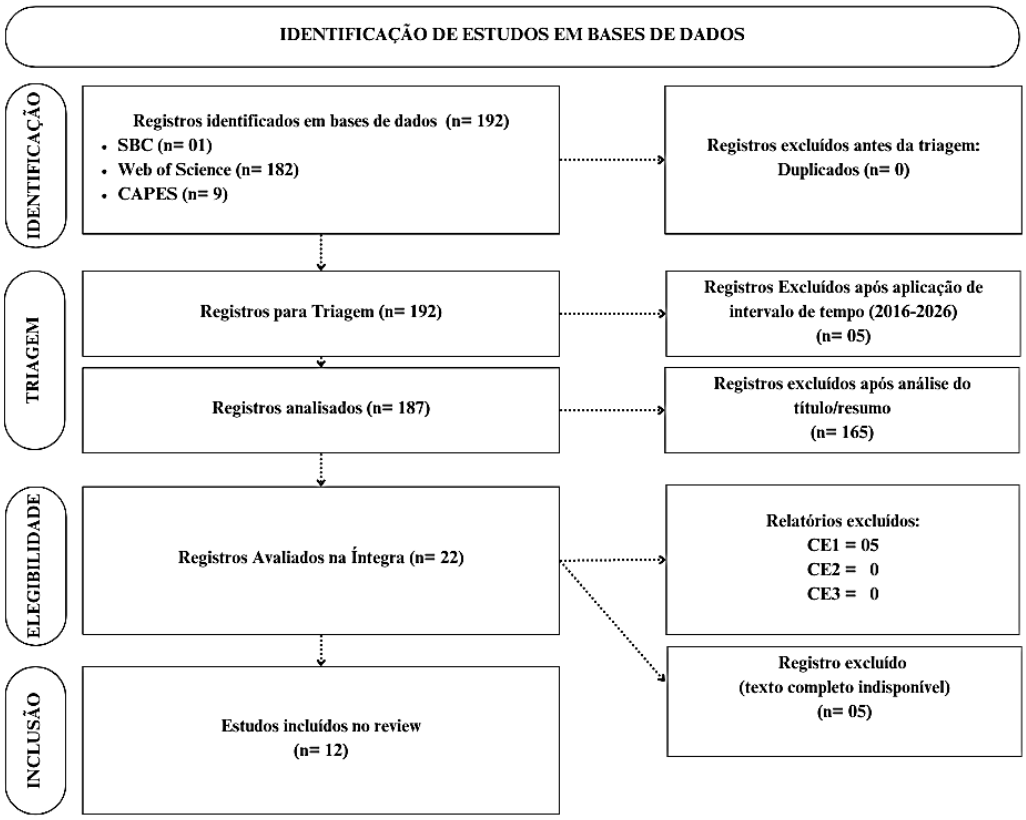

Figura 1. Etapas realizadas na revisão

A aplicação do processo de triagem e elegibilidade, estabelecido pelo protocolo PRISMA, permitiu selecionar os artigos com capacidade de resposta às questões de pesquisa (Q1, Q2, Q3 e Q4) formuladas. Abaixo, o Quadro 4, sintetiza o perfil dos artigos que compõem a amostra final, detalhando a identificação do código atribuído ao estudo, os autores, o ano de publicação, o título e a base de dados de origem.

Quadro 4. Mapeamento dos artigos selecionados

Artigo	Autores/Ano	Título do Artigo	Base de Origem
A01	WALKER et al. (2023)	VisualPDE: Rapid Interactive Simulations of Partial Differential Equations	Web of Science
A02	TESHIMA et al. (2022)	Analysis of echolocation behavior of bats in echo space using acoustic simulation	Web of Science
A03	YANG et al. (2024)	HVS-Unsup: Unsupervised cervical cell instance segmentation method based on human visual simulation	Web of Science
A04	KAHANA et al. (2022)	Micellar Composition Affects Lipid Accretion Kinetics in Molecular Dynamics Simulations: Support for Lipid Network Reproduction	Web of Science
A05	REEN et al. (2025)	Student informed development of virtual reality simulations for teaching and learning in the molecular sciences	Web of Science
A06	REEVES et al. (2023)	Simulation and social network analysis provide insight into the acquisition of tool behaviour in hybrid macaques	Web of Science
A07	ZHAO et al. (2022)	Simulation Palynologists for Pollinosis Prevention: A Progressive Learning of Pollen Localization and Classification for Whole Slide Images	Web of Science
A08	CHEN et al. (2023)	Application and teaching of computer molecular simulation embedded technology and artificial intelligence in drug research and development	Web of Science
A09	ANWAAR et al. (2022)	Combined deep learning and molecular docking simulations approach identifies potentially effective FDA approved drugs for repurposing against SARS-CoV-2	Web of Science
A10	MILLER et al. (2023)	Ensinando complexidade em biologia por meio de simulações baseadas em agentes: a relação entre o conhecimento dos alunos sobre sistemas complexos e o conhecimento de metamodelagem.	CAPES
A11	REEN et al. (2022)	Desenvolvimento de simulações imersivas de realidade virtual cocriadas por estudantes para o ensino de conceitos complexos em biologia molecular e celular.	CAPES
A12	LÓPEZ et al. (2016)	Computational modeling and simulation in biology teaching: a minimally explored field of study with a lot of potentia	CAPES

Fonte: Elaborado pelos autores

Os Resultados estão organizado em torno das quatro questões norteadoras desta pesquisa: a identificação das naturezas pedagógicas que caracterizam as simulações empregadas (Q1), o mapeamento das áreas temáticas da Biologia mais frequentemente abordados por meio desses recursos (Q2), os suportes tecnológicos (Q3) e os perfis de público-alvo (Q4), identificados na literatura.

Natureza pedagógica dos simuladores (Q1):

Ao analisar os artigos selecionados para responder a primeira questão de pesquisa, emergiu um importante indicador: a maior parte das produções científicas sobre simuladores em Biologia ainda se concentra no Ensino Superior ou na pesquisa acadêmica pura. Essa escassez reflete as barreiras históricas de infraestrutura laboratorial e o predomínio de abordagens tradicionais e passivas descritas por Fracalanza (1986) e Paiva et al. (2016). Contudo, a análise detalhada permitiu identificar um conjunto de trabalhos com forte potencial de transposição didática para a Educação Básica, cujas naturezas pedagógicas dialogam diretamente com as teorias de aprendizagem ativa e com as diretrizes da BNCC Computação (Brasil, 2022).

A primeira grande vertente identificada assenta-se na Modelagem baseada em Agentes (ABM), representada no projeto BioGraph 2.0 (A10), com o uso da ferramenta StarLogo Nova, e no uso do NetLogo (A12). Essa abordagem atende diretamente a BNCC Computação, pois estimula o desenvolvimento do pensamento computacional ao propor a compreensão de modelos do mundo real por meio de sistemas simulados.

Ademais, quando o sistema permite que os estudantes construam seus próprios modelos, como no caso do ambiente colaborativo Co-Lab (A12), a natureza pedagógica da simulação desloca-se para a investigação científica pura. Essa Dinâmica encontra amparo na teoria da equilibração de Jean Piaget, ao testar suas próprias hipóteses no simulador frente a resultados inesperados, o estudante enfrenta desequilíbrios cognitivos.

No que tange à superação do caráter abstrato da Biologia celular e molecular destacado por Cassanti et al. (2008), o uso da Realidade Virtual (VR) demonstrado no estudo A05 assume uma natureza pedagógica cinestésica e visual de grande valor para o Ensino Médio, materializando processos invisíveis em tempo real.

Por fim, a inclusão de abordagens como as "Visual Stories", baseadas em simulações matemáticas (VisualPDE) no estudo A01, revela uma natureza pedagógica focada na democratização e transposição didática. Ao superar o formalismo das equações

matemáticas complexas, foca-se na interatividade qualitativa, como a dispersão de um vírus pelo ar, transformando fenômenos complexos em experiências visuais intuitivas e significativas.

Cenário das áreas temáticas da Biologia (Q2):

Os artigos analisados revelam que as simulações têm sido aplicadas em eixos estruturantes, permitindo dar concretude a temas tradicionalmente abstratos. Com base nos artigos analisados, os conteúdos foram mapeados em seis áreas: Genética, Ecologia, Evolução, Biologia celular e molecular, Saúde e Microbiologia e Ciências Ambientais, conforme demonstrado no Quadro 5.

Quadro 5. Áreas temáticas da Biologia

Áreas Temáticas	Conteúdos e estudos selecionados
Genética	Regulação genética e estrutura do DNA (A10)
Ecologia	Dinâmica de ecossistemas, interações predador-presa, cadeias alimentares e impactos no ecossistema (A10)
Evolução	Seleção natural e mecanismos evolutivos (A10)
Biologia celular e molecular	Estrutura e função de plasmídeos, tecnologia de DNA recombinante, fotossíntese e respiração celular (A11)
Saúde e Microbiologia	Transmissão de doenças infecciosas e resposta imune a alérgenos/pólen (A10)
Ciências Ambientais	Aquecimento global e padrões de vegetação (A12)

Fonte: Elaborado pelos autores

Recursos tecnológicos das simulações (Q3):

Ao investigar os pilares computacionais que dão suporte aos ambientes simulados (Q3), os dados do Quadro 6 revelam as principais variáveis investigadas, destacando a tipologia das simulações empregadas e o público alvo a que se destinaram as intervenções didáticas.

Quadro 6. Síntese dos artigos selecionados e suas abordagens de aplicações

Artigo	Tipo de Simulação	Tecnologia utilizada	Público Alvo
A01	Interativa e Exploratória	VisualPDE (software próprio)	Estudantes de Ensino Superior (Graduação)
A02	Simulação acústica bidimensional	Simulação acústica bidimensional Método de Domínio do Tempo de Diferenças Finitas (FDTD).	Etólogos e pesquisadores

A03	Simulação do Processo Cognitivo/Visual Humano integrada a redes neurais de Aprendizado Profundo (Deep Learning)	HVS-Unsup (método e software próprio proposto pelos autores).	Pesquisadores, patologistas e estudantes de Ensino Superior
A04	Simulação por Dinâmica Molecular (DM) de resolução atômica (atomística)	Modelagem cinética combinada com simulações de dinâmica molecular	Pesquisadores, cientistas e estudantes de Pós-graduação
A05	Simulação Imersiva e Interativa em Realidade Virtual (VR)	Simulação customizada em Realidade Virtual integrada a ambientes de captura de dados online.	Estudantes de Ensino Superior e docentes universitários.
A06	Modelagem Baseada em Agentes (ABM - Agent-Based Modelling)	Modelo computacional baseado em agentes aplicados a redes de associação comportamental.	Pesquisadores e estudantes de ensino superior
A07	Simulação de Processo Cognitivo/Visual Humano estruturada por algoritmos de Inteligência Artificial.	Modelo de detecção multiescala e combinação de múltiplos classificadores baseados em redes neurais profundas aplicados a Imagens de Lâmina Inteira	Pesquisadores, profissionais de saúde pública, palinoloxistas e estudantes de Pós-graduação
A08	Simulação por Dinâmica Molecular (MD) combinada com acoplamento molecular (molecular docking) e algoritmos de Inteligência Artificial.	Tecnologia incorporada de simulação molecular baseada em IA (redes neurais profundas e docking de afinidade macromolecular).	Estudantes de Ensino Superior e pesquisadores
A09	Simulações de Ancoramento Molecular (Molecular Docking) e predição de afinidade biofísica.	Redes Neurais Profundas (Deep Learning) combinadas com ferramentas de simulação de acoplamento molecular (como AutoDock Vina ou similares de triagem virtual).	Pesquisadores e estudantes de Ensino Superior
A10	Simulação computacional baseada em agentes (Agent-based simulation)	bIOGRAFIC 2.0 (software próprio proposto pelos autores).	Estudantes (ensino secundário/médio ou superior).
A11	Simulação imersiva em Realidade Virtual (iVR)	Ambientes virtuais imersivos em VR (desenvolvidos sob medida/co-design com estudantes).	Estudantes do Ensino Superior (Graduação)
A12	Modelagem e Simulação Computacional (MSc) variadas.	Levantamento geral de softwares e modelos descritos na literatura da área.	Pesquisadores em Ensino de Ciências e Biologia e docentes.

Fonte: Elaborado pelos autores

Perfil do público-alvo (Q4):

A análise do público-alvo (Q4), observado no Quadro 6, consolida que as simulações descritas nos artigos pesquisados, predominantemente inclui como público-

alvo estudantes de Ensino Superior (graduação), pós-graduandos e pesquisadores especialistas como etnólogos, patologistas e farmacologistas, perfil explícito nos artigos A01, A02, A03, A04, A05, A06, A07, A08 e A09. Esse cenário indica que o desenvolvimento de simuladores de alta complexidade técnica atende prioritariamente as demandas de formação profissional e pesquisa científica avançada de níver macroscópico ou molecular.

Em contrapartida, observa-se que apenas os estudos A10, A11 e A12 mencionam o envolvimento da Educação Básica ou de professores em formação neste nível de ensino. Destaca-se ainda, o estudo A11 pela abordagem que adota a metodologia de co-design, com colaboração de estudantes na criação de ambientes de realidade virtual imersiva.

Em contraste entre a quantidade expressiva de artigos voltados ao Ensino Superior e a escassez de produções para o Ensino Fundamental e Ensino Médio revela uma lacuna importante na literatura. Há uma demanda clara por pesquisas que adaptem tecnologias complexas, como IA e dinâmica molecular para interfaces acessíveis à Educação Básica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo apresentou uma Revisão Sistemática da Literatura com o objetivo de mapear os tipos de simulações aplicadas no ensino de Biologia na Educação Básica. Os resultados obtidos permitiram responder às questões de pesquisa, revelando que, embora a produção científica recente (2016-2026) ainda se concentre predominantemente no Ensino Superior, há um conjunto de ferramentas com poder de transposição didática para a Educação Básica.

Diante desse cenário, esta RSL servirá de base para futuras pesquisas, fornecendo mapeamento teórico e metodológico necessário para o desenho de novas intervenções pedagógicas digitais.

A análise crítica dos dados evidenciou que a natureza pedagógica dessas ferramentas, transcende a mera transmissão de conteúdos, alinhando-se aos processos de equilibração de Piaget e atendendo às diretrizes da BNCC Computação.

Ademais, o ecossistema tecnológico mapeado demonstrou que embora a literatura seja sustentada por arquiteturas complexas de IA e dinâmica molecular , existe uma viabilidade prática de uso de ferramentas baseadas em agentes e realidade virtual no cenário escolar.

Como limitação desta pesquisa, reconhece-se o recorte focado nas bases de dados selecionadas (SBC, Portal CAPES e Web of Science) e a a estratégia de busca que, em determinados cenários, priorizou a alta precisão no campo título, o que pode ter omitido produções que abordam a temática de forma secundária em seu resumos.

Por fim, como trabalhos futuros, sugere-se a realização de pesquisas voltadas aos eixos temáticos menos explorados na literatura.

Palavras-chave: Ensino de Biologia; Simulações Digitais; Revisão Sistemática da Literatura; Tecnologias Educacionais; Educação Básica.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. **Complemento à Base Nacional Comum Curricular: Computação**. Brasília, DF: MEC, 2022.

CASSANTI, A. C. et al. Microbiologia democrática: estratégias de ensino-aprendizagem e formação de professores. **Enciclopédia Biosfera**, v. 4, n. 5, 2008.

CHEN, X. et al. Application and teaching of computer molecular simulation embedded technology and artificial intelligence in drug research and development. **Open Life Sciences**, v. 18, art. 20220675, 2023. DOI: https://doi.org/10.1515/biol-2022-0675.

FRACALANZA, H.; AMARAL, I. A. do; GOUVEIA, M. S. F. **O ensino de ciências no 1º grau**. São Paulo: Atual, 1986. 124 p.

ANWAAR et al. Combined deep learning and molecular docking simulations approach identifies potentially effective FDA approved drugs for repurposing against SARS-CoV-2. **Computers in Biology and Medicine**, v. 141, art. 105049, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105049.

KAHANA, A.; LANCET, D.; PALMAI, Z. Micellar composition affects lipid accretion kinetics in molecular dynamics simulations: support for lipid network reproduction. **Life**, v. 12, n. 7, art. 955, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/life12070955.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**. Keele: Keele University; Durham: Durham University, 2007.

LÓPEZ, S. et al. Modelación y simulación computacional en la enseñanza de la biología: un campo de estudio con mucho potencial pero poco explorado. **Bio-grafía: Escritos sobre la Biología y su Enseñanza**, v. 8, n. 14, p. 101-115, 2015.

MILLER, K. M.; YOON, S. A. Teaching complexity in biology through agent-based simulations: the relationship between students' knowledge of complex systems and metamodeling knowledge. **Frontiers in Education**, v. 8, art. 1198307, p. 1-17, 2023.

PAIVA, M. R. F. et al. Metodologias ativas de ensino-aprendizagem: revisão integrativa. **Sanare: Revista de Políticas Públicas**, v. 15, n. 2, 2016.

PIAGET, J. **A equilibração das estruturas cognitivas: problema central do desenvolvimento**. Tradução de Álvaro Cabral. Rio de Janeiro: Zahar, 1976.

REEN, F. J. et al. Developing student codesigned immersive virtual reality simulations for teaching of challenging concepts in molecular and cellular biology. **FEMS Microbiology Letters**, v. 369, n. 1, p. 1-8, 2022.

REEN, F. J. et al. Student informed development of virtual reality simulations for teaching and learning in the molecular sciences. **Journal of Biological Education**, v. 59, n. 4, p. 604-620, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/00219266.2024.2386250.

REEVES, J. S. et al. Simulation and social network analysis provide insight into the acquisition of tool behaviour in hybrid macaques. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 290, art. 20222276, 2023. DOI: https://doi.org/10.1098/rspb.2022.2276.

TESHIMA, Y. et al. Analysis of echolocation behavior of bats in 'echo space' using acoustic simulation. **BMC Biology**, v. 20, art. 59, 2022. DOI: https://doi.org/10.1186/s12915-022-01253-y.

WALKER, B. J. et al. VisualPDE: rapid interactive simulations of partial differential equations. **Bulletin of Mathematical Biology**, v. 85, art. 113, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11538-023-01218-4.

YANG, X. et al. HVS-Unsup: unsupervised cervical cell instance segmentation method based on human visual simulation. **Computers in Biology and Medicine**, v. 171, art. 108147, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108147.

ZHAO, L. N. et al. Simulation palynologists for pollinosis prevention: a progressive learning of pollen localization and classification for whole slide images. **Biology**, v. 11, art. 1841, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/biology11121841.