

BIM e mudanças climáticas na construção civil: aplicações, limitações e implicações socioambientais

/

BIM and climate change in the construction sector: applications, limitations and socio-environmental implications

/

BIM y cambio climático en la construcción civil: aplicaciones, limitaciones e implicaciones socioambientales

Me. Marcela Fernandes Sarmento

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

marcela.sarmiento@ifpb.edu.br

<https://orcid.org/0009-0008-4809-8373>

Dr. Cleonilson Protásio de Souza

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

protasio@cear.ufpb.br

<https://orcid.org/0000-0001-8182-3516>

Fecha de Recepción: 20 de febrero de 2026

Fecha de Aceptación: 9 de marzo de 2026

Fecha de Publicación: 4 de mayo de 2026

Financiamiento:

El autor declara que este estudio no recibió financiación externa.

Conflictos de interés:

El autor también declara no tener ningún conflicto de intereses.

Correspondencia:

Nombres y Apellidos: Mestre Marcela Fernandes Sarmento

Correo electrónico: marcela.sarmiento@ifpb.edu.br

Dirección postal: Campus I Lot. Cidade Universitaria, João Pessoa - PB, 58051-900, Brasil

Los autores retienen los derechos de autor de este artículo. Revista Inclusiones publica esta obra bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite apropiadamente a los autores originales.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Resumo

Investiga-se como o *Building Information Modeling* (BIM) tem sido aplicado no contexto das mudanças climáticas no setor da construção civil. Parte-se do problema de compreender em que medida tais aplicações contribuem para a mitigação de emissões e quais limitações ainda comprometem sua efetividade. O objetivo foi mapear usos, identificar barreiras técnicas e examinar suas implicações socioambientais. Os resultados evidenciam integração do BIM com a Avaliação do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment* - LCA), Sistemas de Informação Geográfica (GIS), Inteligência Artificial (IA) e métodos multicritério, mas revelam entraves relacionados à baixa interoperabilidade, à escassez de dados regionais e à concentração das aplicações nas fases iniciais do ciclo de vida. A classificação das lacunas indica que limitações frequentemente tratadas como técnicas, podem produzir efeitos socioambientais relevantes. Conclui-se que o BIM constitui uma ferramenta estratégica, embora sua efetividade dependa da superação de entraves técnicos, metodológicos e informacionais.

Palavras-chave: BIM; mudanças climáticas; avaliação do ciclo de vida; sustentabilidade na construção civil; tomada de decisão.

Abstract

This study investigates how Building Information Modeling (BIM) has been applied in the context of climate change in the construction sector. It addresses the problem of understanding to what extent such applications contribute to emissions mitigation and which limitations still compromise their effectiveness. The objective was to map uses, identify technical barriers and examine their socio-environmental implications. The results highlight the integration of BIM with Life Cycle Assessment (LCA), Geographic Information Systems (GIS), Artificial Intelligence (AI) and multicriteria methods, but also reveal obstacles related to low interoperability, scarcity of regional data and the concentration of applications in the early stages of the life cycle. The classification of gaps indicates that limitations frequently treated as technical may produce significant socio-environmental effects. It is concluded that BIM constitutes a strategic tool, although its effectiveness depends on overcoming technical, methodological and informational obstacles.

Keywords: BIM; climate change; life cycle assessment; sustainability in construction; decision-making.

Resumen

Se investiga cómo el Building Information Modeling (BIM) ha sido aplicado en el contexto del cambio climático en el sector de la construcción civil. Se parte del problema de comprender en qué medida tales aplicaciones contribuyen a la mitigación de emisiones y cuáles limitaciones aún comprometen su efectividad. El objetivo fue mapear usos, identificar barreras técnicas y examinar sus

implicaciones socioambientales. Los resultados evidencian la integración del BIM con la Evaluación del ciclo de vida (Life Cycle Assessment – LCA), los Sistemas de Información Geográfica (GIS), la Inteligencia Artificial (IA) y los métodos multicriterio, pero revelan obstáculos relacionados con la baja interoperabilidad, la escasez de datos regionales y la concentración de las aplicaciones en las fases iniciales del ciclo de vida. La clasificación de las lagunas indica que limitaciones frecuentemente tratadas como técnicas pueden producir efectos socioambientales relevantes. Se concluye que el BIM constituye una herramienta estratégica, aunque su efectividad depende de la superación de obstáculos técnicos, metodológicos e informacionales.

Palabras clave: BIM; cambio climático; evaluación del ciclo de vida; sostenibilidad en la construcción civil; toma de decisiones.

Introdução

As mudanças climáticas figuram entre os principais desafios contemporâneos, com repercussões diretas sobre diversos setores socioeconômicos, entre os quais a construção civil se destaca pela magnitude de seus impactos ambientais¹. O setor é responsável por parcela significativa das emissões globais de gases de efeito estufa, sendo estimado em aproximadamente 37% das emissões energéticas e operacionais globais². Tais impactos decorrem tanto da produção e transporte de materiais, associados ao carbono incorporado, quanto da operação do ambiente construído, relativa às emissões operacionais, o que evidencia a necessidade de métodos capazes de apoiar decisões fundamentadas em informações integradas e confiáveis³.

Diante disso, tem-se ampliado a adoção de estratégias voltadas à avaliação e à redução dos impactos ambientais das edificações, com destaque para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), do inglês *Life Cycle Assessment (LCA)*, que permite uma abordagem sistêmica dos fluxos de matéria e energia ao longo do ciclo de vida dos empreendimentos⁴. Entretanto, sua implementação ainda

¹ Nathalia Arenas Fonseca e Muhammad Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings: State of the Art Review”, *Developments in the Built Environment* 15 (outubro de 2023): 100176, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100176>; Wenjie Zhang e Hongwei Ying, “Low Carbon Urban Rail Transit Station City Integration Based on Building Information Modeling and Sensor Fusion”, *Computers and Electrical Engineering* 110 (setembro de 2023): 108850, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108850>.

² Global Alliance for Buildings and Construction United Nations Environment Programme, *Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*, março de 2024, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>.

³ Habib Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”, *Buildings* 14, n. 6 (2024): 1689, <https://doi.org/10.3390/buildings14061689>.

⁴ Rojini Kathiravel et al., “LCA of Net-Zero Energy Residential Buildings with Different HVAC Systems across Canadian Climates: A BIM-Based Fuzzy Approach”, *Energy and Buildings* 306 (março de 2024): 113905, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113905>; Farshid Shadram et al., “An Integrated BIM-Based Framework for Minimizing Embodied Energy during Building

enfrenta limitações relevantes, como a ausência de dados consolidados ao longo das etapas de projeto e execução, dificuldades de integração entre fontes de informação e heterogeneidade nos critérios de análise ambiental, social e econômica⁵. Tais desafios reforçam a necessidade de ferramentas capazes de organizar, relacionar e atualizar informações de modo sistemático.

É neste cenário que o BIM tem se destacado como metodologia voltada à gestão integrada de informações no ciclo de vida das edificações. A modelagem digital paramétrica permite incorporar dados de materiais, desempenho energético, emissões e custos, contribuindo para a análise de cenários e para o apoio à tomada de decisão orientada à sustentabilidade⁶. Além disso, o BIM tem sido associado à integração de diferentes abordagens avaliativas como a LCA, a Análise de Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Costing* – LCC), a Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-LCA) e, de forma mais abrangente, o *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA), que articula dimensões ambientais, econômicas e sociais.⁷

Apesar desses avanços, a consolidação do BIM como ferramenta efetiva no enfrentamento das mudanças climáticas ainda encontra limitações significativas. A integração com abordagens como o LCSA permanece limitada por barreiras técnicas, como interoperabilidade insuficiente, ausência de padronização em bases de dados e dificuldades de automação na extração e conversão de informações⁸. Além disso, embora haja um aumento de estudos que associam o BIM a tecnologias como ACV, GIS, IA e métodos multicritério, as revisões disponíveis tendem a abordar essas relações de forma segmentada, seja por tecnologia, por fase do ciclo de vida ou por dimensão

Design”, *Energy and Buildings* 128 (setembro de 2016): 592–604, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.007>.

⁵ Cristiane Bueno e Márcio Minto Fabricio, “Comparative Analysis between a Complete LCA Study and Results from a BIM-LCA Plug-In”, *Automation in Construction* 90 (junho de 2018): 188–200, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>; Alexander Hollberg et al., “Evaluation of BIM-Based LCA Results for Building Design”, *Automation in Construction* 109 (janeiro de 2020): 102972, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102972>.

⁶ Fonseca e Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings”; Kathiravel et al., “LCA of Net-Zero Energy Residential Buildings with Different HVAC Systems across Canadian Climates”; Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”; Muhammad Umer Zubair et al., “BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco Efficiency and Sustainability in the Construction Sector”, *Buildings* 14, n. 2 (2024): 360, <https://doi.org/10.3390/buildings14020360>.

⁷ Karoline Figueiredo et al., “Sustainable material choice for construction projects: A Life Cycle Sustainability Assessment framework based on BIM and Fuzzy-AHP”, *Building and Environment* 196 (junho de 2021): 107805, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107805>; Walter Kloepffer, “Life cycle sustainability assessment of products”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, n. 2 (2008): 89–95, <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>.

⁸ Bueno e Fabricio, “Comparative Analysis between a Complete LCA Study and Results from a BIM-LCA Plug-In”; Hollberg et al., “Evaluation of BIM-Based LCA Results for Building Design”.

analítica, sem uma articulação integrada voltada especificamente às mudanças climáticas.

Revisões anteriores, como a de Fonseca e Shafique, concentram-se em edifícios sustentáveis em sentido amplo, sem discriminar de forma sistemática como o BIM tem sido operacionalizado no contexto das mudanças climáticas ao longo das diferentes fases do ciclo de vida das construções⁹. De modo complementar, Akbari et al. discutem a integração entre BIM e sustentabilidade, mas não organizam empiricamente as aplicações voltadas às mudanças climáticas nem exploram suas implicações socioambientais¹⁰.

Assim, persiste uma lacuna na literatura: **a ausência de revisões que articulem, de forma integrada, as aplicações do BIM na mitigação e adaptação às mudanças climáticas, as limitações técnicas e metodológicas que condicionam sua efetividade e suas implicações socioambientais.** Essa lacuna é particularmente relevante em um campo marcado por assimetrias tecnológicas e informacionais, no qual decisões baseadas em modelos incompletos tendem a gerar impactos desiguais entre territórios e populações, conforme discutido por Acselrad¹¹.

Nesse sentido, a presente revisão tem como objetivo identificar e analisar criticamente as aplicações do BIM no contexto das mudanças climáticas, examinando como a metodologia tem sido mobilizada em estudos empíricos, modelagens e simulações. Especificamente, busca-se: (a) mapear como o BIM tem sido operacionalizado em estudos voltados à gestão de emissões e impactos ambientais; (b) identificar e classificar abordagens metodológicas e limitações técnicas associadas à integração entre BIM e avaliação de impactos climáticos; e (c) interpretar essas limitações à luz de referenciais teóricos que evidenciem suas implicações socioambientais. Ao fazê-lo, o estudo se insere em uma perspectiva interdisciplinar, reconhecendo que tecnologias digitais não são neutras, mas se articulam a dinâmicas políticas, territoriais e informacionais que condicionam sua capacidade de promover transformações sustentáveis.

1. Metodologia

A presente revisão foi conduzida seguindo as diretrizes PRISMA 2020, utilizadas como referência para a organização, transparência e rastreabilidade do processo de busca e seleção dos estudos¹². Embora o protocolo PRISMA

⁹ Fonseca e Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings”.

¹⁰ Saeed Akbari et al., “Sustainability and Building Information Modelling: Integration, Research Gaps, and Future Directions”, *Automation in Construction* 163 (julho de 2024): 105420, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105420>.

¹¹ Henri Acselrad, “Discursos da sustentabilidade urbana”, *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, n. 1 (maio de 1999): 79, <https://doi.org/10.22296/2317-1529.1999n1p79>.

¹² Matthew J. Page et al., “The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews”, *BMJ*, 29 de março de 2021, n71, <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

seja amplamente adotado em revisões sistemáticas, ele não define, por si, o caráter exaustivo da investigação, podendo ser aplicado a diferentes tipologias de revisão. Neste sentido, esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão qualitativa estruturada, orientada por critérios explícitos de busca, seleção e análise com recorte intencional voltado à identificação de estudos com maior aderência ao problema de pesquisa. Essa abordagem se alinha a tipologias de revisão que priorizam profundidade analítica e interpretação crítica dos estudos, conforme discutido por Grant e Booth ¹³. O objetivo foi identificar, de forma abrangente e comparativa, como o BIM tem sido utilizado em pesquisas sobre mudanças climáticas, considerando dimensões tecnológicas, sociais e territoriais.

A estratégia de busca foi estruturada a partir de três núcleos conceituais: (i) modelagem da informação da construção, (ii) mudanças climáticas e (iii) avaliação do ciclo de vida. A partir desses eixos, foram elaboradas *strings* de busca, buscando capturar estudos que articulassem explicitamente o BIM a instrumentos de análise ambiental, reduzindo o risco de omissões decorrentes da heterogeneidade terminológica do campo.

As buscas foram realizadas em maio de 2025 nas bases *Scopus* e *ScienceDirect*, selecionadas por representarem repositórios consolidados da produção científica internacional nas áreas de engenharia, sustentabilidade e tecnologias digitais aplicadas ao ambiente construído. Foram recuperados 76 registros na *Scopus* e 34 na *ScienceDirect*, totalizando 110 estudos iniciais. As *strings* foram aplicadas utilizando operadores booleanos conforme recomendado por PRISMA 2020: (“Building Information Modeling” OR BIM) AND (“climate change” OR “GHG emissions” OR adaptation) AND (“life cycle assessment” OR LCA OR LCSA OR “sustainable building”).

Foram incluídos artigos revisados por pares, com acesso integral, publicados entre 2015 e 2025, período marcado pela consolidação das abordagens BIM–LCA e pelo avanço das discussões sobre digitalização e sustentabilidade climática. Os critérios de inclusão consideraram estudos que apresentassem: (a) relação explícita entre BIM e mudanças climáticas; (b) aplicação empírica, simulação ou modelagem envolvendo o BIM; (c) descrição metodológica suficiente para análise crítica; (d) integração, total ou parcial, com abordagens de ciclo de vida; e (e) disponibilidade de texto completo.

Foram excluídos estudos que: (a) não apresentavam aplicação prática; (b) tratavam o BIM apenas em nível conceitual; (c) não abordavam impactos ambientais; ou (d) não estavam disponíveis integralmente. O processo de triagem foi realizado em etapas sucessivas: análise de títulos e resumos, seguida de leitura integral dos estudos elegíveis.

¹³ Maria J. Grant e Andrew Booth, “A Typology of Reviews: An Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies”, *Health Information & Libraries Journal* 26, n. 2 (2009): 91–108, <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>.

As referências selecionadas foram organizadas no gerenciador Zotero e analisadas com apoio da plataforma Parsifal. Embora a triagem tenha sido conduzida por um único revisor, procedeu-se à revisão crítica das decisões de inclusão e exclusão, com reavaliação dos casos limítrofes, de modo a reduzir vieses interpretativos.

A qualidade metodológica dos estudos foi avaliada por meio de um *checklist* com seis dimensões. Esses critérios foram definidos a partir dos objetivos da própria revisão, dos critérios de inclusão adotados e das orientações de transparência e organização do PRISMA 2020. Buscou-se avaliar tanto aspectos gerais de qualidade metodológica, como clareza dos procedimentos e presença de dados, quanto aspectos específicos do tema, como o uso efetivo do BIM e sua integração com a avaliação do ciclo de vida. A definição dessas dimensões também dialoga com critérios amplamente utilizados em revisões estruturadas, que consideram a clareza metodológica, a presença de evidências empíricas e a explicitação de limitações como elementos centrais para a análise crítica da literatura¹⁴. Cada dimensão foi pontuada em escala ordinal de 0, 0,5 e 1, permitindo classificar os estudos em níveis de qualidade baixa, média ou alta. Para tornar explícita a construção do *checklist*, a Tabela 1 apresenta as dimensões utilizadas, o que foi avaliado em cada uma delas e sua base de definição.

Tabela 1: Dimensões do checklist de qualidade metodológica

Dimensão	O que foi avaliado	Base de definição
Aderência temática	Se o estudo trata diretamente do tema da revisão	Critérios de inclusão (PRISMA)
Clareza metodológica	Se os métodos são bem descritos	Transparência metodológica
Operacionalização do BIM	Se o BIM é aplicado na prática (e não só citado)	Objetivo da revisão
Integração com ciclo de vida	Se há uso de LCA, LCC, S-LCA ou LCSA	Eixo central da pesquisa
Discussão de limitações	Se o estudo reconhece suas limitações	Análise crítica da literatura
Dados empíricos	Se há dados, simulações ou estudos de caso	Robustez dos resultados

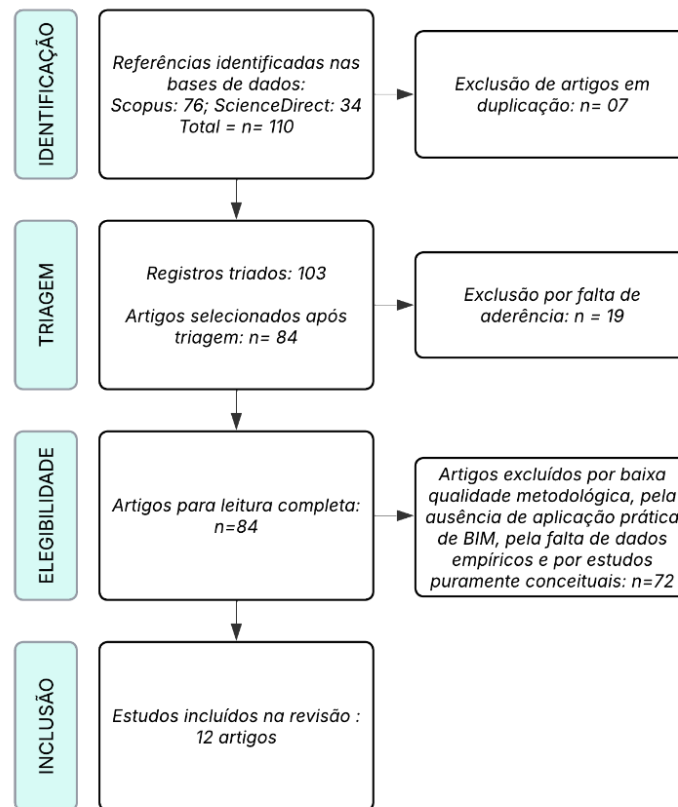
Fonte: Elaboração dos autores.

O *checklist* foi utilizado como ferramenta de apoio à análise comparativa dos estudos, permitindo identificar diferenças de qualidade e aprofundar a interpretação dos resultados. Após as etapas de triagem, 84 estudos permaneceram para leitura integral, resultando na inclusão final de 12 artigos. A redução da amostra não decorreu de escassez de estudos, mas da aplicação

¹⁴ Grant e Booth, "A Typology of Reviews"; Page et al., "The PRISMA 2020 Statement".

de critérios analíticos rigorosos, priorizando trabalhos com maior profundidade metodológica e aderência ao problema investigado. O processo de seleção está representado no fluxograma PRISMA (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma PRISMA



Fonte: Elaboração dos autores.

A extração de dados considerou informações relativas às fases do ciclo de vida analisadas, métodos empregados, tipos de integração tecnológica e limitações reportadas, permitindo identificar padrões, convergências e lacunas nas abordagens analisadas. Reconhecem-se limitações inerentes ao processo de seleção, especialmente relacionadas à heterogeneidade terminológica do campo e à predominância de estudos oriundos de países centrais. Tais aspectos podem introduzir vieses na interpretação dos resultados, sobretudo quando analisados sob a perspectiva das desigualdades socioambientais. Para mitigar esses efeitos, adotou-se transparência na descrição metodológica e na explicitação das lacunas identificadas.

Essa abordagem permitiu construir uma leitura sistemática e crítica da interface entre BIM e mudanças climáticas, evidenciando tanto o potencial da modelagem digital para decisões sustentáveis quanto os desafios técnicos, territoriais e políticos que permeiam sua adoção.

2. Resultados

A análise dos 12 artigos revela um campo em rápida expansão, no qual o BIM é utilizado para diferentes finalidades relacionadas ao enfrentamento das mudanças climáticas. As publicações, concentradas entre 2021 e 2024, indicam um período recente de intensificação das pesquisas, marcado pela adoção de abordagens híbridas e pela incorporação crescente de dados ambientais aos modelos digitais.

Geograficamente, observa-se predominância de estudos desenvolvidos na Ásia, sobretudo China e Paquistão, seguidos por contribuições da Europa (Polônia, Espanha) e da América do Sul (Brasil e Peru).

No conjunto analisado, predominam estudos de caso, modelos computacionais e aplicações empíricas que utilizam o BIM para organizar, parametrizar ou simular informações relacionadas ao ciclo de vida das edificações. Cerca de dois terços dos estudos integram BIM à LCA. Os enfoques variam entre análise de materiais, sistemas construtivos, desempenho energético e infraestrutura.

Trabalhos como os de Zubair *et al.* e Kathiravel *et al.*¹⁵ demonstram aplicações concretas da integração BIM+LCA para simular materiais, sistemas de climatização e rotas de transporte, gerando comparações paramétricas que orientam escolhas sustentáveis. Em pesquisas como as de Ullah *et al.* e Mazur e Olenchuk¹⁶, a modelagem BIM permite mensurar diferenças de carbono incorporado em sistemas estruturais e elementos pré-fabricados.

Outras abordagens expandem essa integração ao incorporar GIS e dados provenientes de sensores, como apresentado por Zhang e Ying¹⁷. De forma complementar, Kaewunruen *et al.*¹⁸ utilizam gêmeos digitais baseados em BIM para avaliar condições de infraestrutura ferroviária, destacando a modelagem dinâmica para apoiar práticas de manutenção ambientalmente orientadas.

¹⁵ Zubair et al., “BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco Efficiency and Sustainability in the Construction Sector”; Kathiravel et al., “LCA of Net-Zero Energy Residential Buildings with Different HVAC Systems across Canadian Climates”.

¹⁶ Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”; Łukasz Mazur e Anatolii Olenchuk, “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach: Carbon Footprint of Masonry and Timber-Frame Constructions in Single-Family Houses”, *Sustainability* 15, n. 21 (2023): 15486, <https://doi.org/10.3390/su152115486>.

¹⁷ Zhang e Ying, “Low Carbon Urban Rail Transit Station City Integration Based on Building Information Modeling and Sensor Fusion”.

¹⁸ Sakdirat Kaewunruen et al., “Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation”, *Sensors* 23, n. 1 (2022): 252, <https://doi.org/10.3390/s23010252>.

No plano metodológico, predomina a associação entre BIM e LCA¹⁹, seguida pelo uso de abordagens computacionais avançadas que lidam com incertezas inerentes às bases de dados ambientais. Técnicas como a lógica *fuzzy* são empregadas para tratar variáveis incompletas ou imprecisas, enquanto técnicas de IA são utilizadas para reconhecimento de padrões e processamento semântico²⁰. Métodos multicritério também aparecem como recurso para comparar alternativas de projeto considerando simultaneamente parâmetros técnicos e ambientais²¹.

Os estudos apontam limitações recorrentes como (a) dificuldade de interoperabilidade entre os *softwares* da metodologia BIM e ferramentas de avaliação ambiental²², (b) a fragmentação metodológica²³, (c) a dificuldade de integrar dados climáticos e operacionais²⁴ e (d) a ausência de padronização semântica e técnica para o uso eficiente da IA²⁵. A Tabela 2 sintetiza as principais características dos estudos analisados, incluindo abordagens, métodos, fases do ciclo de vida, tipos de dados e limitações.

¹⁹ Mazur e Olenchuk, “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach”; M. Marzouk et al., “Evaluating Building Systems Energy Performance Superiority and Inferiority Ranking”, *Journal of Environmental Informatics*, publicação prévia em linha, 2021, <https://doi.org/10.3808/jei.202000448>.

²⁰ Xiaojuan Li et al., “Carbon Emission Evaluation of Prefabricated Concrete Composite Plates during the Building Materialization Stage”, *Building and Environment* 232 (março de 2023): 110045, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110045>; Mateusz Płoszaj-Mazurek e Elżbieta Ryńska, “Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design: Merging the Use of Machine Learning, Large Language Models, and Building Information Modeling for Life Cycle Assessment Tool Development”, *Energies* 17, n. 12 (2024): 2997, <https://doi.org/10.3390/en17122997>.

²¹ Ian Vázquez-Rowe et al., “A Method to Include Life Cycle Assessment Results in Choosing by Advantage (CBA) Multicriteria Decision Analysis. A Case Study for Seismic Retrofit in Peruvian Primary Schools”, *Sustainability* 13, n. 15 (2021): 8139, <https://doi.org/10.3390/su13158139>.

²² Mazur e Olenchuk, “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach”.

²³ Fonseca e Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings”.

²⁴ Natalie Szeligova et al., “Potential of Computed Aided Facility Management for Urban Water Infrastructure with the Focus on Rainwater Management”, *Water* 15, n. 1 (2022): 104, <https://doi.org/10.3390/w15010104>; Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”.

²⁵ Li et al., “Carbon Emission Evaluation of Prefabricated Concrete Composite Plates during the Building Materialization Stage”; Płoszaj-Mazurek e Ryńska, “Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design”.

Tabela 2: Síntese dos estudos analisados

Autor	Abordagem BIM	Método utilizado	Fase da obra	Tipos de dados utilizados	Limitações destacadas
26	BIM + LCA + multicritério	Decisão multicritério + LCA e BIM	Projeto	Modelos de reforço estrutural, dados de LCA, oficinas participativas, critérios técnicos e sociais	Ausência de dados locais; interoperabilidade limitada entre BIM e LCA; frágil integração de critérios ambientais em decisões multicritério
27	BIM + LCA via extração de quantitativos	Comparação de sistemas construtivos	Projeto	Modelagem BIM (Revit), dados de consumo energético, custos operacionais e LCC, dados climáticos, entrevistas com especialistas	Dificuldade na extração automatizada de dados
28	BIM + sensores + digital twins	Manutenção e adaptação de pontes	Operação e manutenção	Modelagem 5D e 6D (Revit, Navisworks), cronograma, estimativas de gases de efeito estufa	Desafios de modelagem e interoperabilidade
29	BIM + modelagem de resiliência	Gestão de infraestrutura hídrica urbana	Operação e manutenção	Modelos BIM (ArchiCAD), mapas de drenagem, dados meteorológicos, topografia, cadastros públicos	Alta exigência computacional para simulações; necessidade de simplificação dos modelos p/ análise; modelo restrito ao contexto urbano da República Tcheca
30	Revisão sistemática de práticas BIM sustentáveis	Revisão de literatura (edifícios sustentáveis)	Todas	Artigos científicos selecionados por critérios de elegibilidade	Baixa integração entre fases do ciclo de vida nos estudos existentes; carência de estudos empíricos interdisciplinares
31	BIM + IA + análise de	Otimização de sistemas	Projeto	Modelagem BIM (Revit), estudos de campo, dados de	Falta de padronização nacional nos fatores de

²⁶ Vázquez-Rowe et al., “A Method to Include Life Cycle Assessment Results in Choosing by Advantage (CBA) Multicriteria Decision Analysis. A Case Study for Seismic Retrofit in Peruvian Primary Schools”.

²⁷ Marzouk et al., “Evaluating Building Systems Energy Performance Superiority and Inferiority Ranking”.

²⁸ Kaewunruen et al., “Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation”.

²⁹ Szeligova et al., “Potential of Computed Aided Facility Management for Urban Water Infrastructure with the Focus on Rainwater Management”.

³⁰ Fonseca e Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings”.

³¹ Li et al., “Carbon Emission Evaluation of Prefabricated Concrete Composite Plates during the Building Materialization Stage”.

	energia embutida	estruturais (IA)		consumo energético e transporte	emissão; aplicabilidade restrita ao contexto chinês
32	BIM + GIS + orçamentação e simulação de carbono	Projeto de estações ferroviárias sustentáveis	Projeto	Modelos BIM, dados geográficos, sensores de fluxo de passageiros, parâmetros térmicos, modelagem LOD e estação real (Ningbo)	Modelo complexo e dependente de grande volume de dados; precisão limitada pelo grau de integração entre sensores e modelagem BIM/GIS
33	BIM + LCA com ferramentas Tally e One Click LCA	Simulação de pegada de carbono	Projeto e construção	Modelagem BIM (Revit), plugin Tally, banco de dados de materiais (EPD – declaração ambiental de produto)	O estudo considera apenas a fase de produção de materiais; ausência de dados de operação ou descarte
34	BIM integrado com a lógica fuzzy + LCA	LCA+ fuzzy em sistemas HVAC em edifícios NetZero	Projeto e operação	Dados simulados de clima e energia em modelos BIM	Incerteza na entrada de dados da LCA; modelo limitado a cenários canadenses e a edifícios residenciais
35	BIM + IA + análise semântica	Otimização com IA para baixa emissão	Projeto	Modelo BIM (formato IFC), dados paramétricos, interface web interativa	Restrições quanto ao tipo de edificação, clima e entrada manual; restrito à plataforma Rhino 6
36	BIM + LCA em processos industriais	Construção modular e pré-fabricada verde	Todas	Modelagem BIM (Rhino 7) baseada em projeto real com simulações energéticas e ambientais	Foco em apenas um edifício específico; ausência de cálculo da fase de renovação; não inclui sistema interno de instalações prediais
37	BIM + LCA + GIS + fórmulas matemáticas	Mitigação e otimização de	Todas	Modelo BIM (Revit), ArcGIS, inventário ambiental (ecoinvent), estudo	Base regional limitada (Islamabad); foco exclusivo em CO ₂ ; não aborda aspectos econômicos nem

³² Zhang e Ying, “Low Carbon Urban Rail Transit Station City Integration Based on Building Information Modeling and Sensor Fusion”.

³³ Mazur e Olenchuk, “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach”.

³⁴ Kathiravel et al., “LCA of Net-Zero Energy Residential Buildings with Different HVAC Systems across Canadian Climates”.

³⁵ Płoszaj-Mazurek e Ryńska, “Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design”.

³⁶ Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”.

³⁷ Zubair et al., “BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco Efficiency and Sustainability in the Construction Sector”.

		transporte e resíduos		de caso real no Paquistão	sociais; dados de resíduos idealizados
--	--	-----------------------	--	---------------------------	--

Fonte: Elaboração dos autores.

3. Discussões

Os resultados indicam que o BIM tem se consolidado como instrumento relevante na produção de diagnósticos ambientais e simulações associadas às mudanças climáticas. Contudo, sua aplicação permanece condicionada a fatores tecnológicos, institucionais e territoriais que se distribuem de forma desigual entre países e contextos. Embora a integração com LCA, GIS, IA e métodos multicritério tenha avançado, persistem limitações estruturais que extrapolam o plano técnico e adquirem implicações políticas e socioambientais relevantes.

A integração do BIM com sensores, GIS e gêmeos digitais representa um avanço relevante na análise dinâmica de desempenho ambiental. Estudos como os de Zhang e Ying³⁸ demonstram a utilização da integração BIM–GIS para avaliação de emissões em infraestruturas urbanas, enquanto aplicações baseadas em gêmeos digitais, como as apresentadas por Kaewunruen et al., indicam potencial para monitoramento contínuo e simulação de cenários de manutenção e adaptação a eventos climáticos extremos³⁹. Essas abordagens ampliam o escopo do BIM, deslocando-o de uma ferramenta de modelagem estática para um sistema de suporte à tomada de decisão ao longo do tempo.

No campo da adaptação às mudanças climáticas, observa-se ainda um uso incipiente, porém promissor, do BIM na modelagem de cenários de resiliência, especialmente em infraestruturas críticas⁴⁰. Tal abordagem possibilita antecipar os impactos de eventos climáticos extremos e simular respostas estruturais, oferecendo subsídios mais robustos para estratégias de mitigação e adaptação.

De forma geral, observa-se que a aplicação do BIM se concentra na etapa inicial do ciclo de vida, fornecendo suporte decisório baseado em dados precisos de materiais, sistemas e processos construtivos, o que viabiliza comparações de cenários para redução de emissões de carbono⁴¹.

³⁸ Zhang e Ying, “Low Carbon Urban Rail Transit Station City Integration Based on Building Information Modeling and Sensor Fusion”.

³⁹ Kaewunruen et al., “Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation”.

⁴⁰ Kaewunruen et al., “Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation”.

⁴¹ Fonseca e Shafique, “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings”; Płoszaj-Mazurek e Ryńska, “Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design”; Ullah et al., “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”.

Apesar desses avanços, os resultados evidenciam limitações recorrentes que restringem a consolidação do BIM como ferramenta integrada de avaliação climática. Entre elas, destacam-se a interoperabilidade limitada entre softwares, a fragmentação metodológica entre diferentes abordagens analíticas, a dificuldade de integrar dados climáticos e operacionais ao longo do ciclo de vida e a ausência de padronização semântica e técnica. Essas limitações não apenas reduzem a eficiência dos processos, mas também comprometem a comparabilidade e a confiabilidade dos resultados.

Mais do que entraves técnicos, tais limitações expressam assimetrias estruturais na produção e no acesso à informação. A predominância de estudos em países centrais, associada à escassez de dados ambientais regionais em países do Sul Global, condiciona a forma como o BIM é aplicado e interpretado. Em contextos de elevada vulnerabilidade climática, a ausência de inventários locais e parâmetros construtivos representativos pode comprometer a capacidade de produzir diagnósticos adequados, transformando limitações técnicas em barreiras socioambientais concretas.

Nessa perspectiva, a contribuição de AcseRad permite compreender que tecnologias ambientais não são neutras, mas incorporam representações específicas sobre território, risco e valor⁴². Quando baseadas em dados incompletos ou descontextualizados, tais tecnologias tendem a reproduzir desigualdades, ao invés de mitigá-las. Assim, a limitação de dados e a dependência de modelos externos configuram barreiras epistêmicas que restringem a autonomia de determinados contextos na produção de conhecimento e na formulação de políticas climáticas.

3.1. Abordagens metodológicas e limitações na integração entre a metodologia BIM e a avaliação de impactos climáticos

As abordagens metodológicas identificadas indicam uma tendência crescente a combinar o BIM com métodos analíticos capazes de ampliar a precisão das avaliações ambientais. Apesar desse movimento, a integração efetiva entre ferramentas permanece limitada por barreiras técnicas, conceituais e operacionais.

A interoperabilidade entre *softwares* BIM e ferramentas de avaliação ambiental constitui um dos principais desafios. A exportação automatizada de dados ainda é restrita, frequentemente exigindo inserção manual de informações, o que aumenta o risco de inconsistências e reduz a eficiência dos processos. Essa limitação está associada à ausência de padronização em bibliotecas de materiais e à diversidade de plataformas utilizadas⁴³.

⁴² AcseRad, “Discursos da sustentabilidade urbana”.

⁴³ Vázquez-Rowe et al., “A Method to Include Life Cycle Assessment Results in Choosing by Advantage (CBA) Multicriteria Decision Analysis. A Case Study for Seismic Retrofit in Peruvian Primary Schools”; Mazur e Olenchuk, “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach”.

Outro desafio significativo diz respeito à qualidade e disponibilidade de dados ambientais. Em vários estudos, especialmente aqueles realizados em países em desenvolvimento, os inventários de carbono ou fatores de emissão são incompletos ou pouco representativos das condições locais, comprometendo a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados⁴⁴. Essa lacuna evidencia a necessidade de desenvolvimento de bases regionais de dados.

Observa-se ainda que grande parte das análises apresenta escopo limitado, frequentemente restrito às fases iniciais do ciclo de vida (*cradle-to-gate*) ou à etapa de projeto. Somente alguns estudos incorporam fases de operação, manutenção e fim de vida, o que reduz a capacidade de estimar impactos ao longo de todo o ciclo de vida. Além disso, muitos trabalhos focam exclusivamente em emissões de CO₂, sem considerar outros impactos ambientais relevantes.

Essas limitações, embora descritas como técnicas, têm efeitos socioambientais significativos. A ausência de dados locais impede que diagnósticos urbanos incorporem vulnerabilidades territoriais, sistemas construtivos regionais e singularidades climáticas, produzindo modelos insuficientes para apoiar políticas em contextos de maior risco. Ao mesmo tempo, a concentração da produção científica em países centrais reforça assimetrias na capacidade de modelagem digital, resultando em diagnósticos que expressam padrões externos e não necessariamente refletem realidades periféricas. Assim, desafios metodológicos tornam-se também desafios de justiça ambiental e de governança climática.

3.2. Identificação de lacunas de pesquisa

A identificação de lacunas constitui etapa fundamental para a consolidação do campo de pesquisa, permitindo evidenciar limitações recorrentes e orientar futuras pesquisas. Nesta análise, as lacunas identificadas foram estruturadas conforme método proposto por Akbari *et al.*, derivado de Booth, Papaioannou e Sutton,⁴⁵ que organiza essas ausências em três categorias:

- *Confusion spotting*: quando conceitos são empregados de forma ambígua;
- *Neglect spotting*: quando temas ou dimensões permanecem insuficientemente explorados;
- *Application spotting*: quando os resultados são restritos a contextos específicos, dificultando replicação e generalização;

A Tabela 3 sintetiza as lacunas identificadas no. Os resultados indicam predominância de lacunas do tipo *neglect spotting*, associadas à ausência de dados locais, à escassez de validação empírica e à limitação das análises às fases iniciais do ciclo de vida. As lacunas do tipo *application spotting*

⁴⁴ Li et al., “Carbon Emission Evaluation of Prefabricated Concrete Composite Plates during the Building Materialization Stage”.

⁴⁵ Akbari et al., “Sustainability and Building Information Modelling”; Andrew Booth et al., *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*, 2º ed. (Mila Steele, 2016).

evidenciam a concentração dos estudos em contextos geográficos e tipologias específicas, restringindo a replicabilidade dos modelos. A ausência de lacunas classificadas como *confusion spotting* sugere relativa maturidade conceitual no campo.

Tabela 3: Tabela de identificação das lacunas

Artigo	Neglect Spotting	Application Spotting
(Vázquez-Rowe <i>et al.</i> , 2021)	<ul style="list-style-type: none"> Falta de dados locais; Fragilidade dos critérios ambientais; Problemas de interoperabilidade; Baixa adoção de compras públicas sustentáveis. 	–
(Marzouk; Abdelbasset; Al-Gahtani, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> Dados simulados sem validação empírica. 	<ul style="list-style-type: none"> Dependência do método multicritério; Sensibilidade a pesos (multicritério).
(Kaewunruen <i>et al.</i> , 2022)	<ul style="list-style-type: none"> Falta de padronização no uso de Digital Twins; Necessidade de co-simulações. 	–
(Szeligova <i>et al.</i> , 2022)	<ul style="list-style-type: none"> Alta exigência computacional. 	<ul style="list-style-type: none"> Modelo restrito ao contexto regional.
(Fonseca Arenas; Shafique, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> Baixa integração entre fases; Foco apenas ambiental; Escassez de estudos empíricos. 	–
(Li <i>et al.</i> , 2023)	<ul style="list-style-type: none"> Falta de padronização nos fatores de emissão; Restrição à fase de materialização. 	<ul style="list-style-type: none"> Dados limitados ao contexto chinês;
(Zhang; Ying, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo complexo e dependente de grande volume de dados. 	<ul style="list-style-type: none"> Foco em projeto específico.
(Mazur; Olenchuk, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> Análise restrita a cradle-to-gate 	<ul style="list-style-type: none"> Restrição a apenas dois sistemas construtivos.
(Kathiravel; Zhu; Haibo Feng, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> Incertezas nos dados <i>fuzzy</i>; Contexto restrito ao Canadá. 	<ul style="list-style-type: none"> Limitação a edifícios residenciais Net Zero.
(Płoszaj-Mazurek; Ryńska, 2024)	<ul style="list-style-type: none"> Dependência de entrada manual nas ferramentas 	<ul style="list-style-type: none"> Restrições de tipologia e clima; Dependência de software específico.
(Ullah <i>et al.</i> , 2024)	<ul style="list-style-type: none"> Ausência de cálculo detalhado para renovação; Exclusão de sistemas internos (MEP) 	<ul style="list-style-type: none"> Estudo restrito a um edifício específico.

(Zubair <i>et al.</i> , 2024)	<ul style="list-style-type: none">• Foco apenas em CO₂;• Dados idealizados.	<ul style="list-style-type: none">• Dados restritos a Islamabad.
-------------------------------	---	--

Fonte: Elaboração dos autores.

Esses padrões indicam fragilidades na robustez dos dados e na amplitude das análises, com destaque para a dependência de inventários idealizados, de *softwares* proprietários e foco quase exclusivo em CO₂. Tais limitações restringem a construção de modelos replicáveis e sensíveis a diferentes contextos socioambientais.

A Tabela 3 não apenas sistematiza as fragilidades existentes na literatura atual, mas também fornece subsídios fundamentais para a definição de futuras pesquisas, apontando onde se concentram os principais desafios a serem superados para consolidar o BIM como instrumento efetivo de sustentabilidade no setor da construção civil.

Para além das limitações técnicas, as lacunas identificadas evidenciam implicações socioambientais relevantes. A ausência de dados regionais, a baixa integração entre dimensões da sustentabilidade e a reprodução de parâmetros de países centrais tendem a produzir diagnósticos descontextualizados, que não refletem vulnerabilidades territoriais específicas. À luz da abordagem de Acsehrad, essas limitações podem ser interpretadas como expressões de diferentes formas de representação do território, nas quais soluções universalizadas desconsideram contextos locais⁴⁶.

A aplicação das matrizes discursivas de Acsehrad (Tabela 4) permite interpretar essas lacunas como expressões políticas: a falta de dados locais compromete a compreensão dos fluxos materiais e energéticos (racionalidade ecoenergética); a ausência de critérios sociais invisibiliza desigualdades de acesso e exposição ao risco (cidadania e qualidade de vida); e a dependência de plataformas restritas fragiliza a legitimidade de políticas baseadas em modelagens tecnicamente estreitas (eficiência). Essa leitura evidencia que lacunas aparentemente técnicas possuem efeitos distributivos concretos, capazes de influenciar a formulação de políticas climáticas e urbanas.

Nesse sentido, a consolidação do BIM como instrumento efetivo de sustentabilidade depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também da incorporação de perspectivas interdisciplinares que considerem dimensões sociais, territoriais e políticas.

A Figura 2 a seguir, sintetiza, de forma integrada, as principais aplicações do BIM no contexto das mudanças climáticas, bem como as limitações técnicas identificadas e suas implicações socioambientais.

⁴⁶ Acsehrad, “Discursos da sustentabilidade urbana”.

Figura 2: Síntese das aplicações, limitações e implicações do BIM frente às mudanças climáticas.



Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 4: Matrizes de Acelrad aplicadas às lacunas identificadas nos artigos

Matriz discursiva	Modelos internos	Possíveis impactos socioambientais relacionados às lacunas	Exemplos
Representação tecno-material da cidade	<ul style="list-style-type: none"> • Racionalidade ecoenergética; • Metabolismo urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Defasagem tecnológica ou metodológica impede prever impactos ambientais reais; • Falta de integração de dados dificulta planejamento eficiente; • Modelos restritos comprometem análise de fluxos energéticos ou resíduos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de integração entre BIM e ferramentas de LCA (Vázquez-Rowe <i>et al.</i>, 2021); • Análise apenas <i>cradle-to-gate</i>, sem operação ou descarte (Mazur e Olenchuk, 2023); • Alta exigência computacional para simulações (Szeligova <i>et al.</i>, 2022).
Cidade como espaço da qualidade de vida	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo da pureza; • Modelo da cidadania; • Modelo do patrimônio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de dados locais limita diagnósticos ambientais; • ausência de critérios sociais pode gerar projetos tecnicamente eficientes, mas socialmente excludentes; • carência de validação empírica deixa populações vulneráveis sem proteção efetiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Predominância do pilar ambiental sem integrar dimensões sociais ou econômicas (Fonseca Arenas e Shafique, 2023); • Estudos restritos a contextos nacionais específicos (Li, 2023; Zubair <i>et al.</i>, 2024); • Falta de dados locais para materiais (Vázquez-Rowe <i>et al.</i>, 2021).
Reconstituição da legitimidade das políticas urbanas	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo da eficiência; • Modelo da equidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soluções técnicas podem gerar desigualdades territoriais; • ausência de participação social amplia risco de decisões técnicas descoladas das necessidades reais; • aplicação restrita a grandes projetos urbanos pode excluir territórios periféricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos aplicados apenas a edifícios ou casos específicos, sem replicabilidade (Ullah <i>et al.</i>, 2024); • Interoperabilidade limitada entre BIM e bases de dados de LCA, dificultando transparência (Vázquez-Rowe <i>et al.</i>, 2021); • Dependência de software específico e plataformas restritas (Płoszaj-Mazurek <i>et al.</i>, 2024).

Fonte: Elaboração dos autores.

Conclusões

Esta pesquisa analisou, à luz das mudanças climáticas no setor da construção civil, como o BIM vem sendo aplicado à mitigação e adaptação de impactos ambientais, bem como as limitações que condicionam sua efetividade e suas implicações socioambientais.

Os resultados evidenciam que o BIM tem se consolidado como um instrumento relevante para a quantificação de emissões de carbono, simulação de cenários projetuais e apoio à tomada de decisão em sustentabilidade, sobretudo quando integrado à LCA, aos GIS, à IA e a métodos multicritério. Nesse contexto, sua aplicação se destaca principalmente nas fases iniciais do ciclo de vida das edificações, contribuindo para a escolha de materiais, sistemas construtivos e estratégias de eficiência energética.

Entretanto, a análise também demonstrou que a efetividade dessas aplicações permanece condicionada a limitações técnicas e metodológicas recorrentes. Destacam-se a baixa interoperabilidade entre plataformas, a ausência de padronização de dados ambientais, a dependência de *softwares* específicos e a escassez de inventários locais confiáveis. Além disso, observa-se uma concentração das análises nas fases de projeto e construção, com menor atenção às etapas de operação, manutenção e fim de vida, o que compromete a abrangência das avaliações ao longo de todo o ciclo de vida.

A sistematização das lacunas de pesquisa evidenciou predominância de problemas associados à ausência de dados locais e à limitação da replicabilidade dos estudos, conforme identificado pelas categorias *neglect spotting* e *application spotting*. Embora tais lacunas sejam frequentemente tratadas como questões técnicas, os resultados indicam que elas produzem implicações socioambientais relevantes. A ausência de bases de dados regionais, por exemplo, limita a capacidade de diferentes territórios de gerar diagnósticos climáticos consistentes, enquanto a dependência de modelos e parâmetros externos pode resultar em soluções descontextualizadas, que não refletem vulnerabilidades locais e tendem a reproduzir desigualdades já existentes.

Nesse sentido, evidencia-se que limitações técnicas não são neutras, mas operam como condicionantes da produção do conhecimento e da tomada de decisão, influenciando a forma como riscos, impactos e prioridades são representados nos modelos digitais. Em contextos marcados por assimetrias tecnológicas e informacionais, tais limitações podem restringir o acesso a ferramentas analíticas mais robustas e comprometer a formulação de políticas públicas sensíveis às especificidades territoriais.

Diante desses achados, conclui-se que o BIM deve ser compreendido não apenas como ferramenta de modelagem, mas como uma metodologia estratégica de integração da informação para a sustentabilidade. Sua consolidação como instrumento efetivo no enfrentamento das mudanças climáticas depende do avanço em três dimensões complementares: no campo tecnológico, com o desenvolvimento de padrões abertos e interoperáveis; no campo dos processos, com a ampliação de bases de dados locais e

representativas; e no campo institucional, com a incorporação de abordagens que integrem dimensões ambientais, econômicas e sociais na tomada de decisão.

Com base nas limitações identificadas, apontam-se direções prioritárias para o aprimoramento da aplicação do BIM no contexto brasileiro e do Sul Global:

(i) desenvolvimento e disponibilização de inventários ambientais nacionais integráveis a modelos BIM, com dados representativos de materiais e sistemas construtivos;

(ii) adoção e aprimoramento de padrões abertos de interoperabilidade, com ênfase na ampliação do uso do formato IFC com atributos ambientais;

(iii) criação de protocolos que permitam a integração entre BIM, LCA e bases públicas de dados, reduzindo a dependência de inserção manual e aumentando a confiabilidade das análises;

(iv) ampliação do uso do BIM para além das fases de projeto, incorporando etapas de operação, manutenção e fim de vida nas avaliações;

(v) incorporação de indicadores sociais e econômicos aos modelos digitais, de modo a alinhar a modelagem à abordagem de sustentabilidade do ciclo de vida;

(vi) incentivo a políticas públicas e diretrizes institucionais que promovam o uso de BIM em habitação e infraestrutura com foco em sustentabilidade e adaptação climática.

Do ponto de vista científico, este estudo sistematiza a produção recente sobre a interface entre BIM e mudanças climáticas, organiza lacunas de forma estruturada e propõe uma interpretação que conecta limitações técnicas a implicações socioambientais. Ao evidenciar que essas limitações não são neutras, mas condicionam a produção de diagnósticos e decisões, a pesquisa contribui para o debate sobre justiça ambiental e governança climática no ambiente construído.

Por fim, observa-se que, mesmo quando não abordadas explicitamente, as aplicações do BIM convergem para a mitigação de impactos climáticos, especialmente por meio da integração de dados ambientais, da análise do ciclo de vida e da otimização do desempenho energético. No entanto, sua efetividade dependerá da capacidade de adaptação dessas ferramentas às realidades locais, de forma a evitar a reprodução de modelos descontextualizados e ampliar sua contribuição para a equidade socioambiental.

Contribuições futuras

O avanço da integração entre BIM e sustentabilidade climática depende de agendas de pesquisa que articulem demandas locais e internacionais. No contexto brasileiro, é prioritário fortalecer inventários ambientais regionais e

integrar bases nacionais a modelos BIM+LCA, ampliando a precisão das análises e reduzindo a dependência de inventários estrangeiros pouco representativos das condições locais.

Também se destaca a necessidade de desenvolver protocolos de interoperabilidade adequados ao ecossistema tecnológico brasileiro, marcado pela coexistência de múltiplos *softwares* e distintos níveis de maturidade BIM. Ferramentas que aproximem modelos IFC de bases públicas abertas e viabilizem a extração automatizada de quantitativos ambientais são fundamentais para expandir o uso da metodologia em políticas públicas, especialmente em habitação e infraestrutura.

No plano internacional, é importante avançar na harmonização de padrões globais de interoperabilidade, promovendo fluxos integrados entre BIM, LCA, GIS e bancos de dados climaticamente sensíveis. O aprimoramento do padrão IFC com atributos ambientais enriquecidos, alinhado a princípios de transparência, comparabilidade e reuso de dados, constitui um caminho promissor para consolidar essas integrações

Além disso, é necessário expandir estudos que incorporem todas as fases do ciclo de vida, e promover abordagens multiescalares que combinem BIM, GIS, IA e dados operacionais contínuos permitindo análises preditivas mais robustas diante de cenários de estresse climático.

Por fim, é essencial fortalecer pesquisas que incorporem indicadores sociais e econômicos aos modelos BIM, aproximando a sustentabilidade digital das agendas de adaptação climática, justiça territorial e equidade socioambiental.

Bibliografia

- Acselrad, Henri. "Discursos da sustentabilidade urbana". *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, n. 1 (maio de 1999): 79. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.1999n1p79>.
- Akbari, Saeed, Moslem Sheikhhoshkar, Farzad Pour Rahimian, Hind Bril El Haouzi, Mina Najafi, e Saeed Talebi. "Sustainability and Building Information Modelling: Integration, Research Gaps, and Future Directions". *Automation in Construction* 163 (julho de 2024): 105420. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105420>.
- Booth, Andrew, Diana Papaioannou, e Anthea Sutton. *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. 2º ed. Mila Steele, 2016.
- Bueno, Cristiane, e Márcio Minto Fabricio. "Comparative Analysis between a Complete LCA Study and Results from a BIM-LCA Plug-In". *Automation*

in Construction 90 (junho de 2018): 188–200.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>.

Figueiredo, Karoline, Rodrigo Pierott, Ahmed W. A. Hammad, e Assed Haddad. “Sustainable material choice for construction projects: A Life Cycle Sustainability Assessment framework based on BIM and Fuzzy-AHP”. *Building and Environment* 196 (junho de 2021): 107805.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107805>.

Fonseca, Nathalia Arenas, e Muhammad Shafique. “Recent Progress on BIM-Based Sustainable Buildings: State of the Art Review”. *Developments in the Built Environment* 15 (outubro de 2023): 100176.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100176>.

Grant, Maria J., e Andrew Booth. “A Typology of Reviews: An Analysis of 14 Review Types and Associated Methodologies”. *Health Information & Libraries Journal* 26, n. 2 (2009): 91–108.
<https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>.

Hollberg, Alexander, Gianluca Genova, e Guillaume Habert. “Evaluation of BIM-Based LCA Results for Building Design”. *Automation in Construction* 109 (janeiro de 2020): 102972.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102972>.

Kaewunruen, Sakdirat, Mohannad AbdelHadi, Manwika Kongpuang, Withit Pansuk, e Alex M. Remennikov. “Digital Twins for Managing Railway Bridge Maintenance, Resilience, and Climate Change Adaptation”. *Sensors* 23, n. 1 (2022): 252. <https://doi.org/10.3390/s23010252>.

Kathiravel, Rojini, Shiyao Zhu, e Haibo Feng. “LCA of Net-Zero Energy Residential Buildings with Different HVAC Systems across Canadian Climates: A BIM-Based Fuzzy Approach”. *Energy and Buildings* 306 (março de 2024): 113905. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113905>.

Kloepffer, Walter. “Life cycle sustainability assessment of products”. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13, n. 2 (2008): 89–95.
<https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>.

Li, Xiaojuan, Wanjun Xie, Ting Yang, Chengxin Lin, e C. Y. Jim. “Carbon Emission Evaluation of Prefabricated Concrete Composite Plates during the Building Materialization Stage”. *Building and Environment* 232 (março de 2023): 110045. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110045>.

Marzouk, M., I. Abdelbasset, e K. Al-Gahtani. “Evaluating Building Systems Energy Performance Superiority and Inferiority Ranking”. *Journal of Environmental Informatics*, publicação prévia em linha, 2021.
<https://doi.org/10.3808/jei.202000448>.

Mazur, Łukasz, e Anatolii Olenchuk. “Life Cycle Assessment and Building Information Modeling Integrated Approach: Carbon Footprint of Masonry and Timber-Frame Constructions in Single-Family Houses”.

- Sustainability* 15, n. 21 (2023): 15486.
<https://doi.org/10.3390/su152115486>.
- Płoszaj-Mazurek, Mateusz, e Elżbieta Ryńska. “Artificial Intelligence and Digital Tools for Assisting Low-Carbon Architectural Design: Merging the Use of Machine Learning, Large Language Models, and Building Information Modeling for Life Cycle Assessment Tool Development”. *Energies* 17, n. 12 (2024): 2997. <https://doi.org/10.3390/en17122997>.
- Page, Matthew J., Joanne E. McKenzie, Patrick M. Bossuyt, et al. “The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews”. *BMJ*, 29 de março de 2021, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Shadram, Farshid, Tim David Johansson, Weizhuo Lu, Jutta Schade, e Thomas Olofsson. “An Integrated BIM-Based Framework for Minimizing Embodied Energy during Building Design”. *Energy and Buildings* 128 (setembro de 2016): 592–604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.007>.
- Szeligova, Natalie, Michal Faltejsek, Marek Teichmann, Frantisek Kuda, e Stanislav Endel. “Potential of Computed Aided Facility Management for Urban Water Infrastructure with the Focus on Rainwater Management”. *Water* 15, n. 1 (2022): 104. <https://doi.org/10.3390/w15010104>.
- Ullah, Habib, Hong Zhang, Baolin Huang, e Yinan Gong. “BIM-Based Digital Construction Strategies to Evaluate Carbon Emissions in Green Prefabricated Buildings”. *Buildings* 14, n. 6 (2024): 1689. <https://doi.org/10.3390/buildings14061689>.
- United Nations Environment Programme, Global Alliance for Buildings and Construction. *Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. março de 2024. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>.
- Vázquez-Rowe, Ian, Cristina Córdova-Arias, Xavier Brioso, e Sandra Santa-Cruz. “A Method to Include Life Cycle Assessment Results in Choosing by Advantage (CBA) Multicriteria Decision Analysis. A Case Study for Seismic Retrofit in Peruvian Primary Schools”. *Sustainability* 13, n. 15 (2021): 8139. <https://doi.org/10.3390/su13158139>.
- Zhang, Wenjie, e Hongwei Ying. “Low Carbon Urban Rail Transit Station City Integration Based on Building Information Modeling and Sensor Fusion”. *Computers and Electrical Engineering* 110 (setembro de 2023): 108850. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108850>.
- Zubair, Muhammad Umer, Mubashir Ali, Muhammad Arsalan Khan, Adil Khan, Muhammad Usman Hassan, e Waqas Arshad Tanoli. “BIM- and GIS-Based Life-Cycle-Assessment Framework for Enhancing Eco

Efficiency and Sustainability in the Construction Sector”. *Buildings* 14, n. 2 (2024): 360. <https://doi.org/10.3390/buildings14020360>.

**REVISTA
INCLUSIONES**
M.R.

**CUADERNOS DE SOFÍA
EDITORIAL**

Las opiniones, análisis y conclusiones del autor son de su responsabilidad y no necesariamente reflejan el pensamiento de Revista Inclusiones.