

urbe

Revista Brasileira de Gestão Urbana

scielo.br/urbe

PUCPRESS

Avaliação híbrida do carbono oculto nas edificações urbanas para apoiar políticas climáticas eficazes

Hybrid assessment of embodied carbon in urban building stock for effective climate policy

Lizzie Pulgrossi ^[a] 

Campinas, SP, Brasil

^[a] Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Marina Morgade Tarrio Rodriguez ^[a] 

Campinas, SP, Brasil

^[a] Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Vanessa Gomes ^[a] 

Campinas, SP, Brasil

^[a] Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

Como citar: Pulgrossi, L., Rodriguez, M. M., & Gomes, V. (2026). Avaliação híbrida do carbono oculto nas edificações urbanas para apoiar políticas climáticas eficazes. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 18, e20250121, 2026. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.018.e20250121>

Resumo

A construção civil é responsável por cerca de 38% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), sendo a fração incorporada frequentemente negligenciada, apesar de poder alcançar até 50% do total do setor até 2050. Sua quantificação enfrenta entraves metodológicos, principalmente pela escassez de dados e pela dificuldade de extrapolar estimativas detalhadas para escalas maiores. Modelos baseados em arquétipos

LP é Arquiteta e Urbanista, Mestra e Doutora em Arquitetura, e-mail: lizpulgrossi@yahoo.com.br

MMTR Arquiteta e Urbanista, Mestra em Engenharia Civil, e-mail: m244881@dac.unicamp.br

VG é Arquiteta e Urbanista, Mestra e Doutora em Eng. Civil (EPUSP), Professora Titular na UNICAMP, e-mail: vangomes@unicamp.br

construtivos oferecem uma alternativa importante para superar este desafio informacional. Este estudo propõe uma metodologia híbrida para estimar emissões de GEE incorporadas em estoques urbanos, focando contextos sem caracterizações abrangentes. A abordagem combina arquétipos volumétricos compostos a partir de dados de legislação urbana (top-down) com arquétipos de materialidade gerados através de informações geométricas e materiais de edificações reais (bottom-up). Informações de emissões de GEE operacionais são adicionadas aos arquétipos, extrapolados à escala urbana para compor dados de vida inteira do estoque edificado. Aplicada à cidade de São Paulo, a abordagem demonstrou precisão satisfatória e consistência com benchmarks internacionais, mesmo com número reduzido de variáveis de entrada. O modelo é replicável e escalável, oferecendo suporte robusto à formulação e ao monitoramento de políticas públicas de descarbonização do ambiente construído e contribuindo para avançar o conhecimento e ação em sustentabilidade urbana.

Palavras-chave: Estoque construído. Arquétipos. Modelagem híbrida. Avaliação do ciclo de vida. Carbono de vida inteira.

Abstract

The construction sector accounts for approximately 38% of global greenhouse gas (GHG) emissions, with embodied carbon often overlooked despite its potential to reach 50% of the sector's total emissions by 2050. Its quantification faces methodological barriers, primarily due to scarce data and the difficulty of scaling detailed estimates to large scales. Archetype-based models offer an important avenue to overcome this information gap. This study introduces a hybrid methodology to estimate embodied GHG emissions in urban building stocks, particularly in settings lacking comprehensive characterization. The approach integrates volumetric archetypes derived from urban legislation (top-down) with materiality archetypes informed by geometric and construction data from real buildings (bottom-up). Operational GHG emissions were incorporated into the archetypes, which were then extrapolated to the urban scale, enabling whole-life carbon assessments of the built stock. Applied to São Paulo, the methodology achieved satisfactory accuracy and alignment with international benchmarks, despite relying on a limited set of input variables. Replicable and scalable, the proposed model offers robust support for designing and monitoring public policies aimed at decarbonizing the built environment, while advancing knowledge and action in urban sustainability.

Keywords: Building stock. Archetypes. Hybrid modelling. Life cycle assessment. Whole-life carbon.

Introdução

O Acordo de Paris, firmado por 196 países em 2015, estabeleceu a meta de limitar o aquecimento global a bem menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C (UNFCCC, 2015). Para atingir esse objetivo, as próximas duas décadas serão decisivas e exigirão reduções rápidas e efetivas das emissões globais de gases de efeito estufa – GEE (IPCC, 2022).

A construção civil ocupa posição estratégica nesse contexto, respondendo por cerca de 38% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) e 35% do consumo mundial de energia (UNEP, 2022). Em áreas urbanas densas, as edificações são fontes relevantes destas emissões (IPCC, 2014), popularmente chamadas de ‘emissões de carbono’. Contudo, as políticas públicas ainda concentram seus esforços nas emissões operacionais, negligenciando a parcela incorporada — oriunda da fabricação de materiais, transporte e execução da obra. Estimativas recentes indicam que, até 2050, este componente poderá representar até 50% das emissões das novas construções, sendo a maior parcela associada à produção de materiais (85%–90%), seguida do transporte (7%–10%) e da execução (3%–5%) (KPMG, 2023). Considerar apenas a eficiência energética operacional, portanto, é insuficiente para alcançar a neutralidade climática.

Dois abordagens principais têm sido empregadas para quantificar as emissões de GEE incorporadas. A modelagem *top-down*, baseada em dados agregados é útil em escala macro (Lanau et al., 2019), enquanto a modelagem *bottom-up* oferece maior precisão, mas enfrenta barreiras de escalabilidade devido à grande quantidade de dados exigida (Zara et al., 2020). Como alternativa, a modelagem híbrida combina essas duas estratégias por meio de arquétipos construtivos, permitindo estimativas robustas em escala urbana (Lanau et al., 2019; Mastrucci et al., 2017; Gomes et al., 2022) e fornecendo subsídios valiosos para políticas públicas e análises regulatórias (Loga et al., 2016).

Arquétipos construtivos agrupam características essenciais de edificações — como altura, ano de construção, uso e sistema construtivo — em representações sintéticas (Colleto & Gomes, 2021). Apesar de seu potencial, permanecem desafios quanto à representatividade, à escassez de dados e ao risco de simplificação excessiva. Em revisão abrangente, Mastrucci et al. (2017) identificaram preferência pelo uso de arquétipos em 12 de 15 estudos, pela redução da demanda de dados e tempo computacional. Apenas três trabalhos aplicaram modelagem no nível do edifício, todos em contextos europeus com ampla base de informações. A predominância de estudos na Europa reflete a existência de bancos estruturados, como EPISCOPE e TABULA (Röck, 2023). Se, mesmo em países pioneiros, persistem lacunas relevantes na compreensão das emissões em escala urbana, no Brasil, os trabalhos envolvendo arquétipos de emissões, que viabilizem análises mais precisas e ofereçam suporte sólido à formulação de políticas públicas voltadas à neutralidade climática nas cidades são ainda mais raros.

Questão de pesquisa e Objetivos

Diante das lacunas identificadas, este estudo parte de uma questão central: *como estimar de forma inicial as emissões de GEE incorporadas em edificações urbanas, equilibrando simplificação metodológica e viabilidade prática, de modo a apoiar políticas públicas eficazes de descarbonização?* Essa questão é especialmente relevante em contextos urbanos sem caracterização prévia do estoque construído e com escassez de dados específicos sobre emissões incorporadas.

O objetivo geral é propor, aplicar e avaliar uma abordagem híbrida para estimar emissões incorporadas em estoques urbanos, integrando dados agregados de legislação urbana (top-down) com informações geométricas e construtivas de edificações reais (bottom-up), fundamentada na Avaliação do Ciclo de Vida das Edificações (ACVed). Essa combinação permite extrapolar resultados da escala do edifício (microescala) para o nível urbano (macroescala).

Para operacionalizar este objetivo, definiram-se dois objetivos específicos:

- Desenvolver arquétipos volumétricos representativos das principais tipologias locais, com base em legislações urbanísticas e dados do mercado imobiliário;
- Definir arquétipos de materialidade construtiva, refletindo materiais e técnicas predominantes nas tipologias analisadas.

A metodologia foi aplicada e validada na cidade de São Paulo, considerando tipologias residenciais e comerciais por sua relevância no contexto edificado local e nacional. A aplicação demonstrou consistência metodológica e alinhamento com referências internacionais, reforçando o potencial da abordagem como ferramenta replicável e escalável, capaz de subsidiar políticas públicas de mitigação do setor da construção em diferentes realidades urbanas.

Método

Para estimar as emissões de GEE incorporadas no estoque construído em escala urbana, este estudo integrou abordagens *top-down* e *bottom-up* em um modelo híbrido desenvolvido em três etapas (Figura 1).

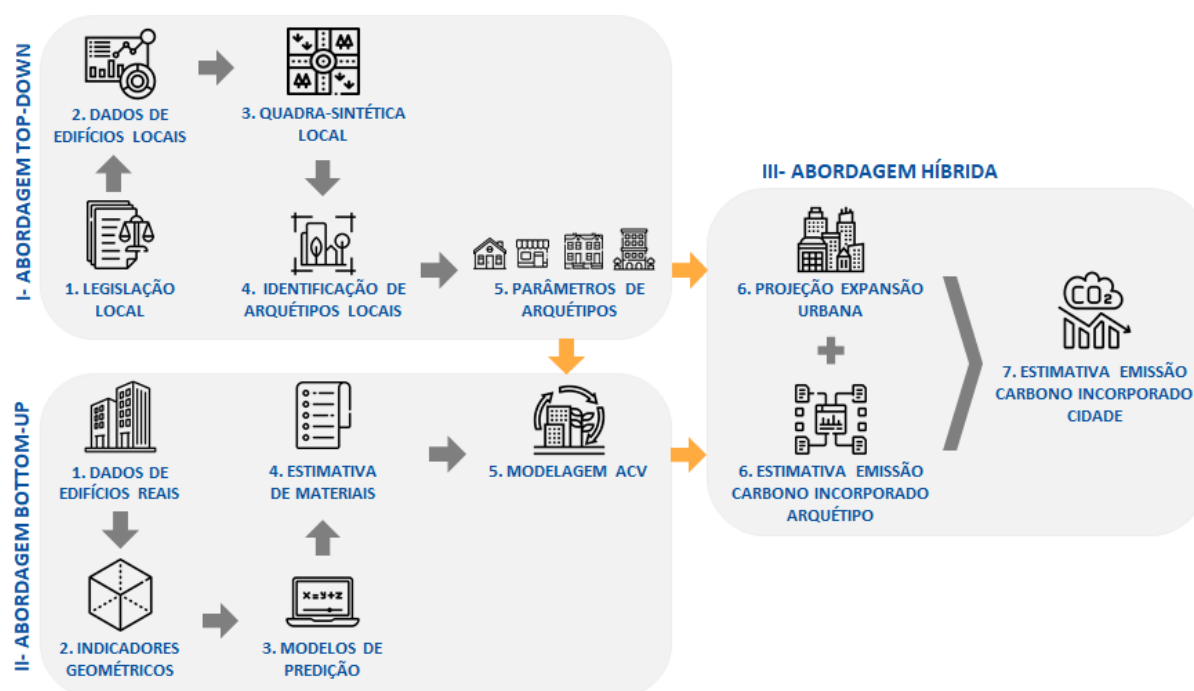


Figura 1- Estrutura geral do método de pesquisa, apresentando a sequência de desenvolvimento e complementaridades das abordagens top-down e bottom-up. Fonte: Autores (2025).

Na primeira etapa (top-down), com base em dados urbanísticos e construtivos reais, foi estruturada uma quadra-sintética em mesoescala, composta por arquétipos representativos das principais tipologias de uso residencial e comercial, que somam cerca de 90% da área construída na cidade. A legislação vigente orientou a definição de oito arquétipos volumétricos finais, de modo a refletir padrões locais de ocupação.

Para superar a carência de inventários detalhados de materiais, na segunda etapa (bottom-up), os arquétipos foram detalhados por meio de ACVed baseadas em processos, reconhecidas por sua precisão. Foram levantados parâmetros geométricos (área de pavimento tipo, número de pavimentos, altura entre lajes, áreas de fachada e cobertura) e quantidades de materiais associados à superestrutura e ao envelope de edificações reais representativas. Modelos estatísticos de regressão asseguraram a consistência das estimativas, reduzindo incertezas. A quantificação de materiais seguiu os cadernos técnicos do SINAPI (2025), organizados por subsistemas construtivos. A modelagem de ciclo de vida foi conduzida segundo as normas ISO 14040/14044 e EN 15978, com escopo de “berço ao túmulo” (A1–A5, B4, C1–C4) e horizonte de 50 anos. Foram considerados cenários locais de produção, transporte e destinação de resíduos. As simulações foram realizadas no SimaPro 9.4, utilizando a base Ecoinvent 3.8.

Na etapa final, considerando os parâmetros legislativos e construtivos definidos anteriormente, os arquétipos foram aplicados à escala urbana, permitindo estimar as emissões de GEE incorporada no conjunto simulado de edificações e projetar seus impactos urbanos. As taxas de crescimento urbano entre 2016 e 2021 foram calculadas a partir da área construída por subtipologia. A taxa média geométrica de crescimento (CAGR) foi aplicada para projetar a expansão urbana até 2050. As áreas projetadas foram então combinadas com os benchmarks de carbono incorporado obtidos para cada arquétipo, permitindo estimar emissões futuras do estoque urbano em cenários de expansão.

Etapa I – Modelagem top-down de arquétipos volumétricos e parâmetros gerais da quadra sintética

O desenvolvimento deste estudo baseou-se em dados do Município de São Paulo (MSP), selecionado por sua ampla disponibilidade de informações urbanísticas e construtivas, além de sua relevância na formulação de políticas públicas voltadas à descarbonização urbana.

A legislação municipal orientou tanto a caracterização dos arquétipos quanto a estruturação da quadra-sintética e sua integração. Dado o crescimento projetado para a cidade, os padrões adotados possibilitam extrapolações em escala municipal e nacional, ampliando a aplicabilidade da metodologia (Figura 2).

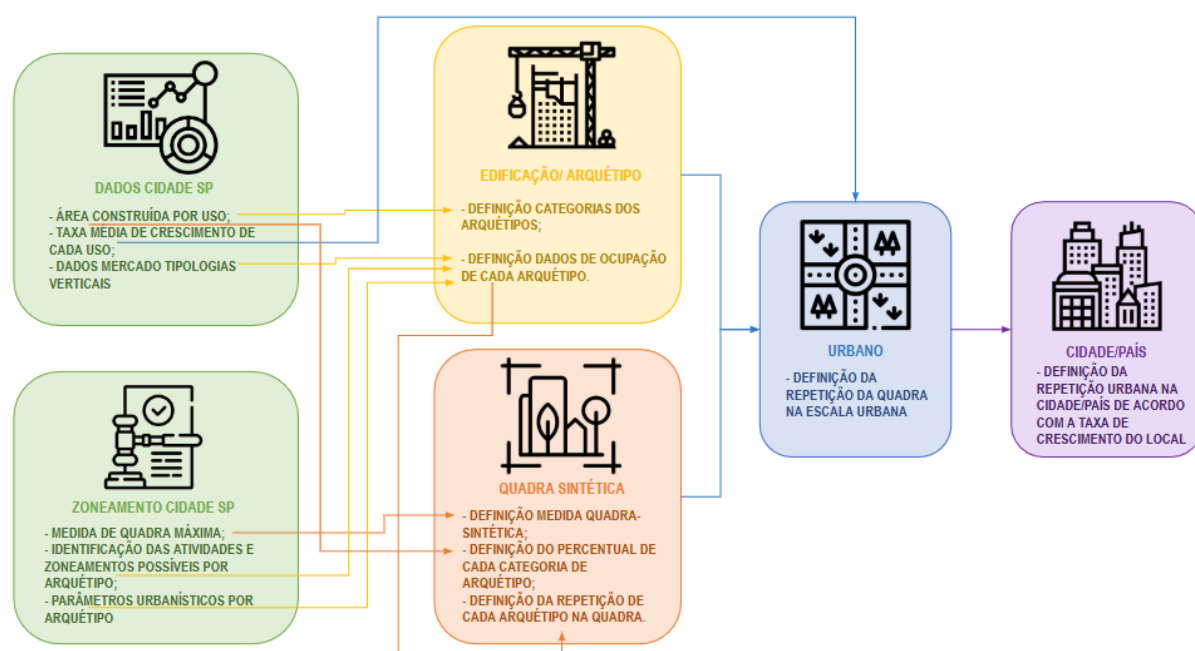


Figura 2 – Relação entre as informações contidas dentro da macroescala e mesoescala. Fonte: Autores (2025).

A partir da área construída total de São Paulo (Informação suplementar IS-T1) (SMUL, 2022), foram identificados os usos mais representativos na composição urbana, correspondendo a aproximadamente 90% do total construído. Para fins analíticos, esses usos foram agrupados por similaridade em tipologias e subtipologias (Tabela 1). A média de área construída de cada subtipologia definiu sua proporção na composição da quadra-sintética.

Na definição dos arquétipos residenciais e comerciais, as zonas urbanas correspondentes foram mapeadas com base na legislação, permitindo a identificação dos principais parâmetros urbanísticos – como coeficiente de aproveitamento (CA), taxa de ocupação (TO), recuos e altura máxima. Esses fatores determinaram padrões de ocupação e adensamento.

A legislação de São Paulo classifica os usos em grupos específicos e as atividades permitidas. Com base nessa categorização, as quatro subtipologias foram associadas às respectivas zonas compatíveis (IS-T2).

Tabela 1 – Área construída (em milhões de m²) por subtipologia considerada no estudo de São Paulo

Tipologia	Subtipologia	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Área Média*	Percentual Médio**
Residencial	Horizontal	162,1	163,5	164,6	165,1	166	168,5	164,97	35,45%
	Vertical	171,3	176,3	180,4	183,4	187,3	190,7	181,57	39,01%
Comercial	Horizontal	66,1	66,3	66,6	66,9	67,4	68,8	67,02	14,40%
	Vertical	48,9	50,5	51,3	52,35	53,6	54,5	51,86	11,14%

* Média aritmética da área construída extraída dos dados de 2016 a 2021. ** Extraído do total da área média. Fonte: adaptado de SMUL (2022).

A partir dessa análise, e considerando os parâmetros urbanísticos predominantes, foram estabelecidas as características dos arquétipos volumétricos. Para os valores de CA, TO e altura máxima, adotou-se a moda estatística — valor mais frequente — como critério para mitigar a influência de outliers.

Dada a variação de altura nas subtipologias verticais, foram criadas três categorias: baixa, intermediária e alta, resultando em oito arquétipos finais (Tabela 2).

Tabela 2 - Moda estatística dos parâmetros urbanísticos disponíveis na Lei de uso e ocupação do solo do MSP adotados para desenvolvimento dos arquétipos volumétricos

Tipologia	Arquétipo	CA Máximo	TO Legislação	Altura Máxima (m)
Residencial	Horizontal	1	0,85	N/A
	Vertical Baixo	4	0,85	28
	Vertical Intermediário	4	0,85	45
	Vertical Alto	4	0,85	75
Comercial	Horizontal	2	0,85	N/A
	Vertical Baixo	2	0,85	15
	Vertical Intermediário	2	0,85	28
	Vertical Alto	2	0,85	48

Fonte: Autores (2025).

Etapa II - Modelagem bottom-up de arquétipos de materialidade (ACV baseada em processos)

Caracterização geométrica

A construção de arquétipos voltados à estimativa de emissões de GEE incorporadas exige parâmetros geométricos realistas, obtidos a partir de edificações existentes. Para isso, foram analisados três conjuntos amostrais representando as quatro subtipologias da quadra-sintética:

- **Edifícios residenciais e comerciais horizontais:** 12 casos de construções térreas ou assobradadas, abrangendo padrões econômicos baixo, médio e alto;
- **Edifícios residenciais verticais:** 12 casos de edifícios multifamiliares, com variações de altura e padrão econômico;
- **Edifícios comerciais verticais:** 10 casos em plantas livres ou salas, com alturas variadas.

Todas as edificações utilizam estrutura em concreto armado, refletindo a prática construtiva predominante da cidade.

A caracterização geométrica foi realizada a partir de projetos arquitetônicos e listas de materiais, contemplando as seguintes variáveis:

- Área e perímetro do pavimento tipo;
- Altura entre pavimentos tipo;
- Número de pavimentos tipo;
- Área e perímetro das janelas;
- Área de telhado;
- Área construída total (corpo da torre);
- Massa de aço e volume de concreto da superestrutura.

Para os edifícios residenciais verticais, os dados de aço e concreto foram complementados por Oliveira (2013). Nos demais casos, por fontes secundárias da literatura.

Devido à variabilidade geométrica dos pavimentos térreos, adotou-se, para fins de modelagem, a equivalência ao pavimento tipo, visando padronização e viabilidade analítica.

Análise estatística das variáveis geométricas no modelo preditivo paramétrico

A análise estatística das variáveis geométricas foi essencial tanto para o desenvolvimento de modelos preditivos robustos quanto para a compreensão das incertezas nas simulações.

Utilizou-se o coeficiente de correlação linear (R) para avaliar a intensidade e direção da relação entre variáveis numéricas, definindo aquelas com maior potencial preditivo. Seguindo a escala de Pearson, correlações com $R > 0,6$ foram consideradas fortes (Callegari-Jacques, 2003), possibilitando a aplicação de regressão linear simples para gerar equações preditivas de sete indicadores geométricos, os quais permitiram estimativas dos serviços construtivos associados à superestrutura e ao envelope das edificações.

A qualidade dos modelos foi aferida pelo coeficiente de determinação (R^2), que expressa a proporção da variância explicada pela regressão (valores elevados indicam maior precisão nas estimativas), sendo complementada por testes de significância estatística (teste-t, 95% de confiança) e pela verificação dos pressupostos de linearidade, independência, normalidade e homocedasticidade.

A dispersão dos dados foi analisada com base no desvio padrão (DP) e no coeficiente de variação (CV). Conforme Nanni (1981, apud Hirota, 1987), considerou-se aceitável um CV de até $\pm 25\%$, critério amplamente reconhecido em estudos anteriores (Hirota, 1987; Otero, 2000; Parisotto, 2003).

A aderência aos critérios estatísticos garantiu maior precisão na estimativa de materiais e, consequentemente, nas projeções de GEE incorporadas, assegurando a representatividade dos dados e a confiabilidade dos resultados para embasar estratégias de mitigação.

Cenários de consumo de materiais

A análise dos estudos de caso e da literatura identificou os elementos construtivos mais utilizados em edificações comerciais e residenciais típicas de São Paulo. Com base nesses dados, definiram-se as seguintes composições por subsistema:

- Superestrutura: Pilares, vigas e lajes em concreto armado.
- Vedação externa: Alvenaria em bloco de concreto (14x19x 39 cm);
- Revestimento externo: Fachada rebocada com pintura acrílica;
- Esquadria externa: Alumínio natural com vidro simples de 4 mm;
- Cobertura:

- a. Edifícios horizontais e residenciais verticais: Telha ondulada de fibrocimento sobre estrutura de madeira.
- b. Edifícios verticais comerciais: Laje impermeabilizada com manta asfáltica.

A quantificação dos materiais foi baseada nos cadernos técnicos do SINAPI (2025), referência nacional por sua abrangência, atualizações regulares e acesso público, em conformidade com diretrizes internacionais que incentivam a redução de barreiras econômicas na avaliação ambiental.

As composições foram organizadas por subsistema, excluindo-se serviços preliminares, construções temporárias e elementos não incorporados à edificação. Para simplificação, o pavimento térreo foi assumido com as mesmas características do pavimento tipo.

Elementos de alta variabilidade — como fundações, subsolos e áreas complementares (reservatórios, casas de máquinas, guaritas, áreas de lazer etc.) — foram excluídos por atenderem a condições específicas de solo e projeto.

Baseados nos parâmetros urbanísticos de cada arquétipo e nas equações de regressão estabelecidas, estimaram-se as quantidades de serviços construtivos e os volumes de materiais consumidos correspondentes. Essa abordagem permitiu uma modelagem eficiente, padronizada e representativa das emissões de carbono incorporado.

Modelagem do ciclo de vida

O estudo seguiu as diretrizes das normas ISO 14040:2006 (ISO, 2006a), ISO 14044:2006 (ISO, 2006b), ISO 21931-1:2022 (ISO, 2022), EN 15978:2011 (CEN, 2011) e EN 15804:2012+A2:2019 (CEN, 2019), focando exclusivamente as emissões incorporadas. Foram excluídos os módulos operacionais B6 (energia), B7 (água) e o módulo D (benefícios além-fronteiras do sistema).

Na etapa de produto (A1–A3), o inventário foi elaborado através de listas pré-definidas de materiais e respectivos quantitativos. Para a etapa de construção (A5), consideraram-se as perdas médias de materiais da TCPO (Pini, 2008); na ausência de dados, adotou-se 10% da massa inventariada. Os consumos energéticos das etapas A5 e C1 (demolição) foram obtidos por pesquisa de mercado e aplicados à área construída total.

O transporte no módulo A4 considerou as condições logísticas da cidade de São Paulo, e no módulo C2, adotou-se distância média de 21,77 km para destinação final (Brasil, 2023). Os cenários de tratamento de resíduos (C3–C4) seguiram as proporções de Pulgrossi (2020).

O período de referência foi de 50 anos. A reposição de materiais (B4) foi modelada conforme a vida útil dos elementos construtivos orientada pela NBR 15575:2021 (ABNT, 2021). A Tabela 3 resume principais aspectos da modelagem.

A modelagem ACVed permitiu calcular as emissões incorporadas totais por arquétipo, viabilizando a construção de um sistema de benchmark — com valores mínimo, máximo e típico — para as tipologias residencial e comercial.

Tabela 3 – Modelagem ACVed utilizada

Descrição	Aspectos de modelagem
Objetivo	Estimar as emissões de GEE incorporadas no ciclo de vida de arquétipos da cidade de São Paulo
Equivalente Funcional	Arquétipos horizontais e verticais (residencial e comercial)

Descrição	Aspectos de modelagem
Unidades de referência	Área construída (m ²) e Área construída por ano (m ² ano)
Fluxos de referência	Correspondentes às unidades de referência
Escopo / Fronteira do sistema	Berço ao túmulo: Etapas A1-A3; A4-A5; B4; C1-4
Limite Geográfico	São Paulo – SP – Brasil
Período de referência	50 anos
Base de dados de inventário	Ecoinvent 3.8 - allocation, cut-off by classification – unit
Software ACV	SimaPro 9.4.0.2
Metodologia de avaliação	EN 15804+A2 Method V1.03
Categoria de avaliação de impacto	Mudança climática (kg CO _{2eq})
Subsistemas construtivos	SUPERESTRUTURA E ENVELOPE: Superestrutura, Cobertura, Vedações externas, Esquadrias externas, Revestimentos externos.

Fonte: Autores (2025).

Etapa III – Abordagem híbrida

Com base na área construída total do município de São Paulo entre 2016 e 2021, calcularam-se as taxas de crescimento anuais, e analisaram-se as tendências lineares por subtipologia. As Figuras 3 e 4 evidenciam a tendência de desaceleração da verticalização naquele período.

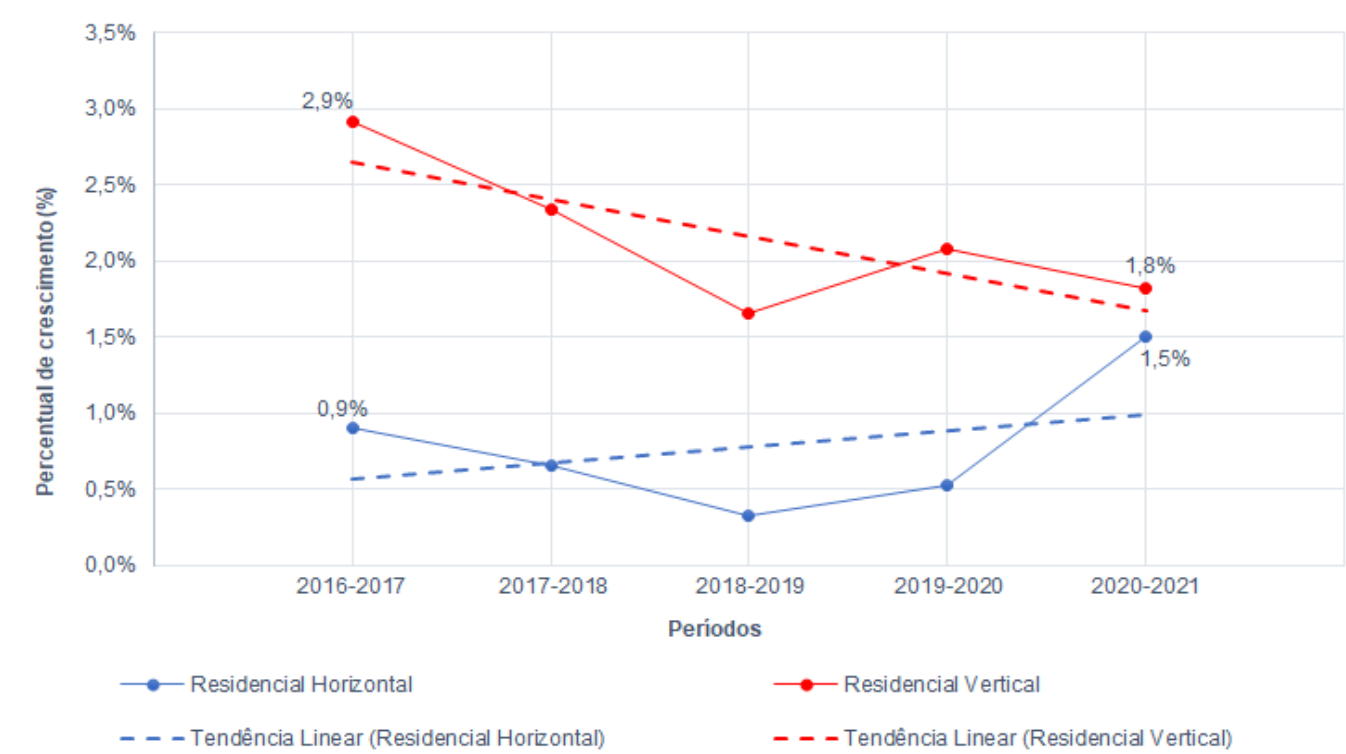


Figura 3 - Taxa anual de crescimento da tipologia residencial de São Paulo em 2016-2021. Fonte: Autores (2025).

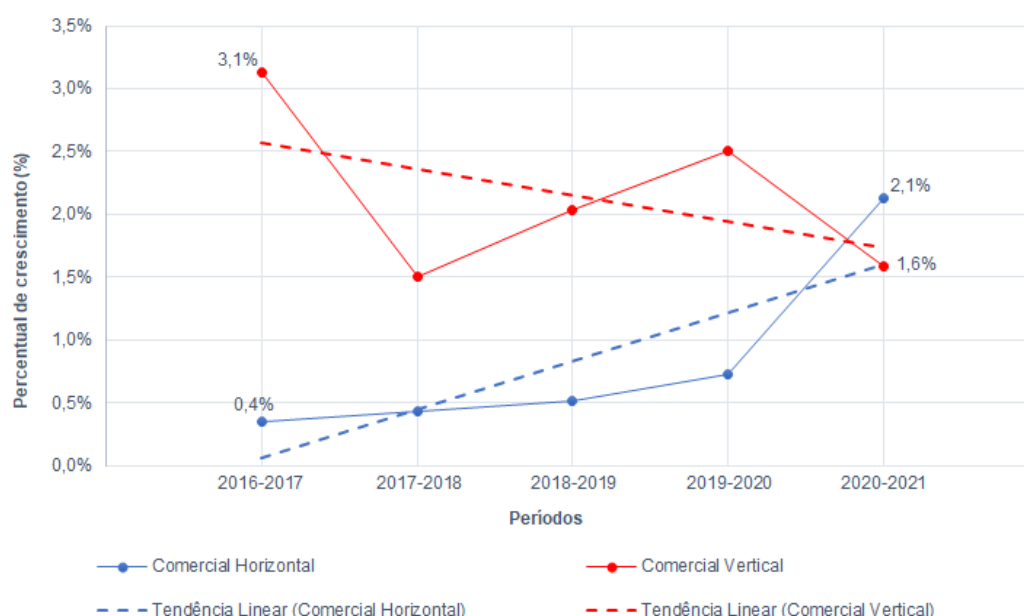


Figura 4 - Taxa anual de crescimento da tipologia comercial de São Paulo em 2016-2021. Fonte: Autores (2025).

As tendências de crescimento (Tabela 4) foram aplicadas à área construída de 2021 — último dado disponível — para projetar a expansão urbana em intervalos de cinco anos até 2050. Utilizou-se a taxa média geométrica de crescimento (CAGR), por refletir de forma mais precisa o comportamento acumulado da área construída, reduzindo distorções causadas por oscilações pontuais e oferecendo uma estimativa mais estável do ritmo de crescimento.

Na etapa final, as projeções de área construída para cada arquétipo foram combinadas aos respectivos benchmarks de emissões de GEE incorporadas, permitindo estimar as emissões totais futuras ao longo do ciclo de vida das edificações. Essa abordagem viabiliza uma análise prospectiva consistente do impacto das emissões incorporadas em cenários de expansão urbana.

Tabela 4 – Área construída e tendência anual de crescimento por subtipologia de São Paulo em 2021

Tipologia	Subtipologia	Área construída total (2021)	Tendência de crescimento
Residencial	Horizontal	168.505.074	1,10%
	Vertical	190.673.694	1,43%
Comercial	Horizontal	68.845.073	1,99%
	Vertical	54.463.961	1,53%

Fonte: Autores (2025).

Resultados

Parametrização de arquétipos residenciais e comerciais, nas variantes horizontal e vertical

Arquétipos verticais

Para os arquétipos verticais, dada a diversidade geométrica e de altura, utilizaram-se dados de mercado local associados à legislação urbana. Para o arquétipo residencial vertical, adotou-se uma

configuração interna típica na cidade: quatro unidades habitacionais de até 45 m² por pavimento tipo (Secovi-SP, 2024), variando a quantidade de elevadores conforme a altura da edificação.

A legislação define duas alturas possíveis (28 m e altura livre), levando à adoção de três variações comuns: 9 (~28 m), 15 e 25 pavimentos tipo (Teixeira et al., 2015). Assim, determinou-se os parâmetros urbanísticos para três arquétipos residenciais verticais (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros urbanísticos de arquétipo residencial vertical

Parâmetros	Baixo	Intermediário	Alto
Área Pavimento Tipo			
Área Térreo	213,30 m ²	221,46 m ²	245,94 m ²
Altura Edificação (sem cobertura)	28,00 m	45,00 m	75,00 m
Altura Edificação (com cobertura)	29,20 m	46,20 m	76,20 m
Número Pavimentos Tipo	9	15	25
Número Total Pavimentos	10	16	26
Área Construída Total	2.133,00 m ²	3.543,36 m ²	6.394,44 m ²

Fonte: Autores (2025).

Para os arquétipos comerciais verticais, com base em levantamentos de mercado de área construída e número de edificações, definiu-se uma área média total construída para três tipologias distintas, e combinou-se com o gabarito de altura para determinar o número de pavimentos e a área média por andar (Tabela 6). O gabarito foi definido a partir da moda observada na faixa intermediária, e adotou-se as observações mínima e máxima para os arquétipos baixo e alto, respectivamente.

Tabela 6 – Parâmetros urbanísticos de arquétipo comercial vertical

Parâmetros	Baixo	Intermediário	Alto
Área Pavimento Tipo			
Área Térreo	100,00 m ²	519,09 m ²	983,76 m ²
Altura Edificação (sem cobertura)	15,00 m	28,00 m	48,00 m
Altura Edificação (com cobertura)	16,20 m	29,20 m	49,20 m
Número Pavimentos Tipo	5	10	16
Número Total Pavimentos	6	11	17
Área Construída Total	600,00 m ²	5.710,00 m ²	16.724,00 m ²

Fonte: Autores (2025).

Arquétipos horizontais

Diferentemente dos modelos verticais – definidos por altura e número de pavimentos – os arquétipos horizontais residenciais e comerciais foram derivados da relação com o lote: dimensões e recuos obrigatórios, respeitando CA máximo e TO permitidos (Figura 5). Adotou-se o padrão mais comum de lote urbano em São Paulo (10×20 m), e as características arquitetônicas típicas de sobrados. Para o arquétipo comercial, o segundo pavimento foi modelado como mezanino, conforme práticas usuais. A Tabela 7 apresenta os parâmetros urbanísticos utilizados na definição desses arquétipos.

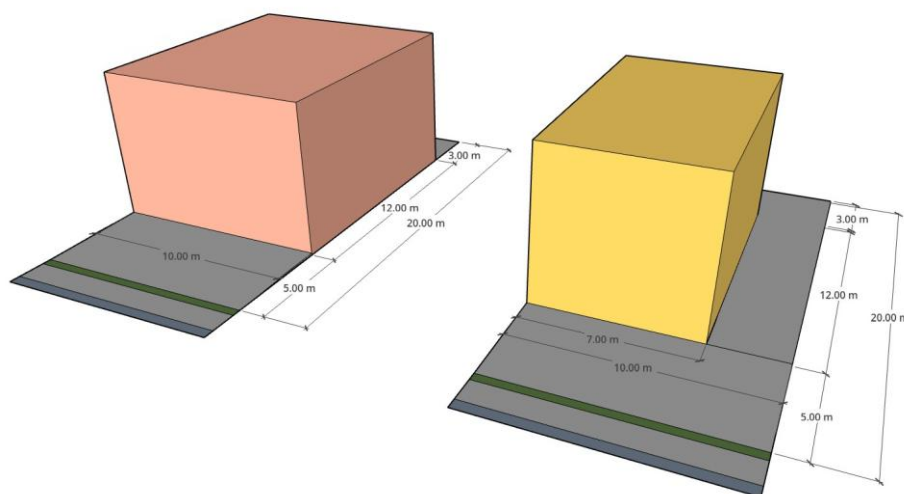


Figura 5 – Esquema da ocupação comercial (laranja) e residencial (amarelo) horizontais. Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Parâmetros para arquétipos horizontais residencial e comercial.

Parâmetros	Residencial	Comercial
Área Pavimento Tipo	84,00 m ²	58,50 m ²
Área Térreo	84,00 m ²	120,00 m ²
Altura Edificação (sem cobertura)	6,10 m	6,10 m
Altura Edificação (com cobertura)	7,81 m	7,81 m
Número Pavimentos Tipo	1	1
Número Total Pavimentos	2	1,5
Área Construída Total	168,00 m ²	178,50m ²

Fonte: Autores (2025).

Equações para predição de serviços de construção

Os modelos de regressão indicaram associações fortes ($R > 0,6$) entre as variáveis geométricas do envelope e a área de pavimento-tipo (Atp), e entre as quantidades de aço e concreto da superestrutura e a área construída total (Ac) (Tabela 8).

Tabela 8 – Relação entre subsistemas construtivos, indicadores geométricos e variável correlacionada.

Subsistema construtivo	Indicador geométrico (Variável dependente - y)	Unid.	Variável correlacionada (Variável independente - x)
Vedação externa	Área líquida de vedação externa	m ²	Área pavimento tipo
Revestimento externo	Área líquida de revestimento externo	m ²	
Esquadria externa	Perímetro de esquadria externa	m	
	Área de esquadria externa	m ²	
Cobertura	Área telhada	m ²	
Superestrutura	Massa de aço da superestrutura	kg	Área construída total
	Volume de concreto da superestrutura	m ³	

Fonte: Autores (2025).

Os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) elevados e os testes-t indicaram significância estatística (valor- p abaixo do nível de 5%, $p < 0,05$), mesmo para os modelos com R^2 inferior a 80% (Tabelas 9, 10 e 11). Para a cobertura de edifícios comerciais verticais, não foi gerada equação de regressão, adotando-se diretamente a área total de laje impermeabilizada como referência.

Tabela 9 - Modelo de regressão linear simples – Edifícios residenciais e comerciais horizontais.

Indicador geométrico	R	Equação regressão	R^2	valor- p
Área líquida de vedação externa	0,92	$y = 0,9632x + 44,874$	85,2%	1,86E-05
Área líquida de revestimento externo	0,92	$y = 1,0177x + 47,584$	85,5%	1,68E-05
Perímetro de esquadria externa	0,88	$y = 0,5662x + 1,3991$	78,2%	1,34E-04
Área de esquadria externa	0,86	$y = 0,3003x - 7,9391$	74,1%	3,25E-04
Área telhada	0,96	$y = 1,1522x + 18,775$	92,6%	5,48E-07
Massa de aço de superestrutura	0,92	$y = 11,836x - 274,73$	85,2%	6,14E-5
Volume de concreto de superestrutura	0,92	$y = 0,191x - 4,0953$	85,5%	1,30E-4

Fonte: Autores (2025).

Tabela 10 – Modelo de regressão linear simples – Edifícios residenciais verticais.

Indicador geométrico	R	Equação regressão	R^2	valor- p
Área líquida de vedação externa	0,89	$y = 0,4427x + 69,256$	78,7%	1,188E-04
Área líquida de revestimento externo	0,89	$y = 0,4737x + 76,237$	78,6%	1,229E-04
Perímetro de esquadria externa	0,82	$y = 0,275x + 32,802$	67,7%	10,190E-04
Área de esquadria externa	0,89	$y = 0,1122x + 10,872$	78,5%	1,262E-04
Área telhada	0,92	$y = 0,8893x + 5,9033$	83,8%	14,218E-04
Massa de aço de superestrutura	0,98	$y = 21,133x - 4882,4$	96,3%	5,739E-23
Volume de concreto de superestrutura	0,95	$y = 0,1885x + 176,99$	91,1%	2,507E-17

Fonte: Autores (2025).

Tabela 11 – Modelo de regressão linear simples – Edifícios comerciais verticais.

Indicador geométrico	R	Equação regressão	R^2	valor- p
Área líquida de vedação externa	0,95	$y = 0,1474x + 137,85$	90,3%	2,52E-05
Área líquida de revestimento externo	0,97	$y = 0,1853x + 158,61$	93,6%	4,84E-06
Perímetro de esquadria externa	0,92	$y = 0,1461x + 91,051$	84,7%	1,62E-04
Área de esquadria externa	0,95	$y = 0,1113x + 44,418$	90,1%	2,71E-05
Área telhada	--	--	--	--
Massa de aço de superestrutura	0,93	$y = 13,831x + 18948$	86,6%	9,25E-05
Volume de concreto de superestrutura	0,93	$y = 0,2x + 226,34$	87,0%	8,28E-05

Fonte: Autores (2025).

Os estudos de caso de edificações residenciais verticais apresentaram CV inferiores a 25%, dentro do limite considerado aceitável por Nanni (1981, apud Hirota, 1987), indicando boa uniformidade geométrica (Tabela 12) resultante da padronização construtiva em projetos multifamiliares. Tendência semelhante foi observada nos edifícios horizontais, exceto na quantidade e área de esquadrias, associadas ao padrão econômico: quanto mais elevado, maiores. Já os edifícios comerciais verticais foram os mais heterogêneos ($CV \approx 40\%$), evidenciando a ausência de padronização nas soluções arquitetônicas desse segmento.

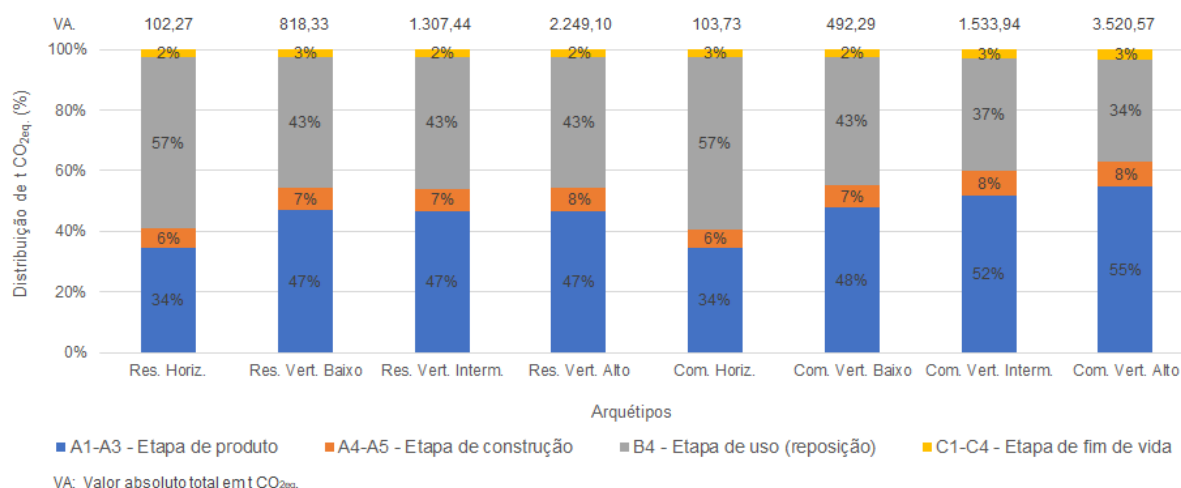
Tabela 12 – Média, desvio-padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) dos indicadores geométricos considerados.

Indicador geométrico	Res. e Com. Horiz.			Residencial Vert.			Comercial Vert.		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV	Média	DP	CV
Área líquida de vedação externa	1,47	0,36	24,4%	0,67	0,14	21,2%	0,41	0,21	52,7%
Área líquida de revestimento externo	1,56	0,38	24,4%	0,73	0,16	21,4%	0,48	0,22	46,5%
Perímetro de esquadria externa	0,59	0,14	24,3%	0,38	0,09	22,6%	0,27	0,19	70,7%
Área de esquadria externa	0,22	0,08	35,6%	0,15	0,03	18,3%	0,17	0,09	51,2%
Área telhada	1,34	0,19	14,4%	0,90	0,13	14,7%	--	--	--
Massa de aço de superestrutura	9,13	3,26	35,7%	19,57	4,80	24,5%	18,72	5,38	28,8%
Volume de concreto de superestrutura	0,15	0,05	34,6%	0,21	0,03	15,9%	0,26	0,07	26,2%

Fonte: Autores (2025).

Estimativa de emissões de GEE incorporadas por arquétipo

Os arquétipos residenciais e comerciais horizontais apresentaram padrões semelhantes de impacto no ciclo de vida, em que a etapa de reposição respondeu pela maior parcela das emissões de carbono incorporado (57%), seguida da etapa de produto (34%). Já para os arquétipos verticais residenciais e comerciais as contribuições se invertem, e a etapa de produto concentrou entre 47–55% das emissões, refletindo a maior massa de materiais compondo a superestrutura (Figura 6). Esses resultados evidenciam a influência da morfologia edificada na distribuição das emissões ao longo do ciclo de vida.


Figura 6 - Emissões de GEE incorporadas em cada arquétipo por etapa do ciclo de vida. Fonte: Autores (2025).

Foram derivados sistemas de benchmarks de carbono incorporado (mínimo–médio–máximo) para cada arquétipo (Figura 7), com variabilidade alinhada aos CV dos indicadores geométricos observados: variação de $\pm 24\%$ em relação à média para os horizontais (residenciais e comerciais); inferior a $\pm 20\%$ para o vertical residencial; e de aproximadamente $\pm 40\%$ para o vertical comercial.

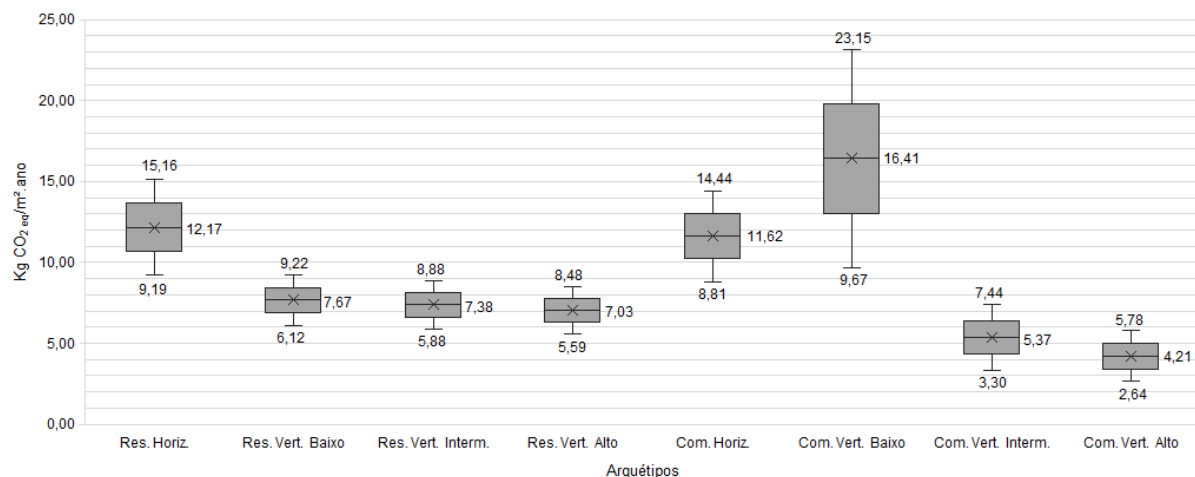


Figura 7 - Sistema de benchmark de emissões de GEE incorporadas (mínimo, média e máximo) para cada arquétipo ($\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2.\text{ano}$). Fonte: Autores (2025).

Projeção de emissões de GEE incorporadas para a cidade de São Paulo

A projeção da expansão urbana por arquétipo até 2050 combinou as taxas de crescimento observadas (2016–2021, via CAGR) à estratificação por tipologia na área construída de 2021, espelhada na quadra-sintética (Tabela 13). A combinação das áreas projetadas com os benchmarks resultou em curvas de emissões por tipologia (Figura 8). O subtipo residencial horizontal concentra o maior volume acumulado, cerca de 38,3 milhões de $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ até 2050. Arquétipos verticais baixos – comerciais e residenciais - apresentaram trajetórias semelhantes, com diferenças explicadas por benchmark específico (maior para o comercial) e taxa de crescimento (maior para o residencial). Detalhes adicionais estão disponíveis em IS-T3 e IS-T4.

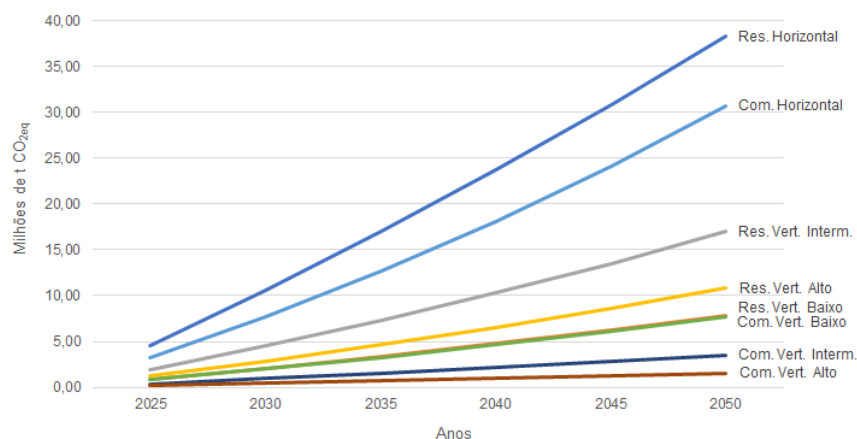


Figura 8 – Projeção de crescimento de emissões incorporadas por arquétipo de São Paulo. Fonte: Autores (2025).

Tabela 13 – Projeção de crescimento da área de cada arquétipo na cidade de São Paulo

		Projeção de crescimento (m^2)							
Tipologia	Arquétipo	Proporção	Área (m^2)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Residencial	Horizontal	100%	168	7.537.458	17.435.164	27.889.354	38.931.313	50.594.088	62.912.584
	Vertical Baixo	21,05%	2.133	2.345.542	5.471.154	8.826.731	12.429.192	16.296.701	20.448.760
	Vert. Intermediário	47,37%	3.543	5.278.306	12.312.046	19.863.289	27.970.109	36.673.384	46.016.997

Projeção de crescimento (m ²)									
Tipologia	Arquétipo	Proporção	Área (m ²)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Comercial	Vertical Alto	31,58%	6.394	3.518.871	8.208.031	13.242.192	18.646.740	24.448.923	30.677.998
	Horizontal	100%	179	5.645.829	13.358.594	21.869.936	31.262.541	41.627.652	53.065.964
	Vertical Baixo	31%	600	1.057.247	2.472.385	3.999.145	5.646.331	7.423.442	9.340.726
	Vert. Intermediário	44%	5.710	1.500.609	3.509.192	5.676.206	8.014.147	10.536.498	13.257.805
	Vertical Alto	25%	16.724	852.619	1.993.859	3.225.117	4.553.493	5.986.647	7.532.844

Fonte: Autores (2025).

Discussão

Desenvolvimento de arquétipos volumétricos

O método proposto baseia-se em legislações urbanísticas – amplamente disponíveis – para estruturar arquétipos volumétricos, traduzindo parâmetros normativos em representações do estoque edificado. Essa estratégia demonstrou utilidade especial em contextos de baixa disponibilidade de dados, nos quais arquétipos locais ainda não existem. Diferentemente da maioria dos estudos anteriores, concentrados na Europa e apoiados em bases consolidadas como TABULA e EPISCOPE (Röck, 2023), nossa abordagem introduz flexibilidade e replicabilidade em países em desenvolvimento, podendo incorporar imagens de satélite como fonte complementar para caracterizar padrões construtivos.

O uso de um conjunto reduzido de variáveis facilita a aplicação em diferentes localidades. A definição dos arquétipos de materialidade, baseada em 34 observações distribuídas entre usos residenciais e comerciais, reflete aproximadamente 90% da área construída de São Paulo, mas simplificações, como a exclusão de 10% da área construída restante, podem introduzir viés sistemático, subestimando emissões e obscurecendo hotspots relevantes. Tipologias de menor participação na área total — como hospitais, data centers, escolas e edificações especiais — apresentam intensidades de emissões desproporcionais e impacto estratégico para políticas públicas de descarbonização. Sem sua inclusão, perdem-se alavancas regulatórias importantes, como compras públicas, zoneamento e códigos de obra.

Adotar um coeficiente de variação (CV) de até 25%, conforme recomendado em estudos anteriores (Hirota, 1987; Otero, 2000; Parisotto, 2003), implica que seriam necessários cerca de 24 casos por arquétipo para atingir precisão de $\pm 10\%$ (IC 95%). Esse patamar não foi alcançado em nenhum estudo encontrado na literatura, evidenciando a dificuldade de coleta de dados sobre edificações e justificando a estratégia proposta. Para mitigar esse limite, a extrapolação urbana considerou pesos populacionais dos subtipos no estoque real documentado, reduzindo riscos de paradoxos de agregação e assegurando representatividade.

Reconhecemos as limitações amostrais, em especial nos edifícios comerciais, sujeitas a vieses de conveniência e potenciais subestimações da variância real do universo. Ainda assim, a proposta deve ser entendida como um ponto de partida pragmático em cenários de restrição de informações.

Embora adequado como prova de conceito, o método pode ser aprimorado. Recomenda-se explorar modelos hierárquicos com shrinkage, cálculo de intervalos de confiança via bootstrapping, e propagação de incertezas por Monte Carlo. A disponibilização de uma matriz de cobertura de covariáveis (subtipo $\times$ número de casos $\times$ período) permitiria maior transparência, validação cruzada e aná-

lises de sensibilidade, identificando parâmetros dominantes e orientando prioridades de coleta futura. Para ampliar o escopo, a inclusão progressiva de tipologias hoje negligenciadas, ainda que com conjuntos sentinela mínimos proporcionais à sua participação no estoque, fortalecerá a acurácia do inventário urbano e o lastro técnico às decisões de descarbonização.

Acurácia dos benchmarks de emissões incorporadas

A análise dos arquétipos construtivos revelou que edificações com menor área construída apresentam maior intensidade de emissões por metro quadrado, padrão já observado por Evangelista et al. (2018): 9,36 kg CO_{2eq}/m².ano para uma residência de 56 m², frente a 4,09 kg CO_{2eq}/m².ano em um edifício multifamiliar de 16 pavimentos (10.788 m²).

Trigaux et al. (2021) atribuem a variação dos benchmarks a diferenças de escopo, limites de sistema e objetivos metodológicos. Após harmonização de dados de 8 certificações e 15 estudos, reportaram faixas interquartis de 4,5 a 7,5 kg CO_{2eq}/m².ano para edifícios residenciais e 6,8 a 9,1 kg CO_{2eq}/m².ano para não residenciais, com período de referência de 50 anos.

Röck et al. (2020), baseados em 238 estudos em cinco zonas climáticas, identificaram variações de 3,24 a 13,24 kg CO_{2eq}/m².ano para residenciais e 7,13 a 19,95 kg CO_{2eq}/m².ano para comerciais. Szalay (2024) reportou 9,5 a 15,5 kg CO_{2eq}/m².ano para residências unifamiliares e 9,1 a 14,3 kg CO_{2eq}/m².ano para multifamiliares na Hungria. Na República Tcheca, Zelezná et al. (2024) estimaram 11,7 a 16,9 kg CO_{2eq}/m².ano para edifícios multifamiliares completos, destacando que a água operacional representa menos de 1% das emissões totais.

Wiik (2025) propôs benchmarks para a Noruega: 8,63 kg CO_{2eq}/m².ano para residenciais e 10,4 kg CO_{2eq}/m².ano para comerciais, considerando ciclo de vida completo em 60 anos.

Os benchmarks deste estudo referem-se exclusivamente à superestrutura e ao envelope, compostos por sistemas pesados (concreto, aço, alvenaria, argamassa). A NBR 15575:2021 pressupõe alta frequência de reposição, o que pode superestimar emissões em relação a estudos internacionais (Morales et al., 2020; Pulgrossi, 2020; Reguly et al., 2018). Ainda assim, os valores estimados para São Paulo — especialmente em arquétipos residenciais — encontram-se dentro das faixas internacionais (Figuras 9 e 10).

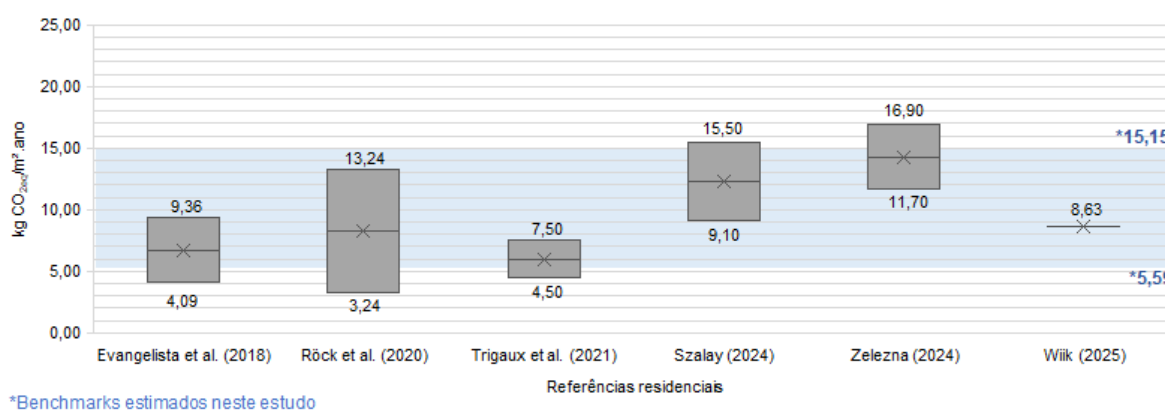


Figura 9 - Comparação entre sistemas de benchmark de edifícios residenciais obtidos neste estudo e valores apresentados na literatura. Fonte: Autores (2025).

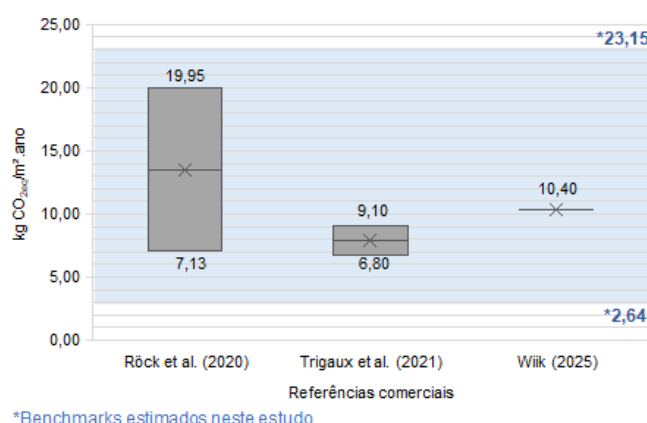


Figura 10 - Comparação entre sistemas de benchmark de edifícios comerciais obtidos neste estudo e valores apresentados na literatura. Fonte: Autores (2025).

O modelo proposto para estimar emissões incorporadas utilizou apenas dois dados de entrada: área do pavimento-tipo e área construída total — o que representa um avanço metodológico: maior simplicidade e aplicabilidade urbana em contextos com restrição de dados, ainda que com algum sacrifício de precisão. Aceitando-se uma variação de até $\pm 25\%$ nas estimativas de serviços construtivos (Nanni, 1981, apud Hirota, 1987), os benchmarks calculados são estatisticamente robustos, embora a heterogeneidade dos comerciais verticais indique necessidade de estratificação futura por número de pavimentos ou configuração interna (por ex.: salas, lajes livres, salões) para melhorar a precisão dos modelos.

Apesar do número de observações nas amostras ter sido limitado pela dificuldade de coleta de informações, observou-se que edifícios residenciais verticais tendem a apresentar organização geométrica homogênea, independentemente do padrão econômico. Já em edifícios horizontais, o nível socioeconômico influencia significativamente elementos como esquadrias. Recomenda-se, portanto, a estratificação futura por número de pavimentos e por padrão econômico, de modo a reduzir a variância e aprimorar a confiabilidade das estimativas.

Implicações em escala urbana (macroescala)

Quando projetadas em escala urbana, as emissões GEE incorporadas indicam um crescimento de quase nove vezes até 2050, em relação a 2025. Esse cenário acende dois alertas críticos. Primeiro, sobre a limitação geral das políticas públicas atuais, que, salvo exceções pontuais em países europeus, focam quase exclusivamente na redução de emissões operacionais.

Röck et al. (2021) identificam, no contexto europeu, tendências relevantes para edificações construídas antes (alta emissão operacional, baixa emissão incorporada) e depois das normas rigorosas de eficiência energética (baixa emissão operacional, porém com um pico significativo de emissões durante a construção, o "carbon spike"), decorrente da intensificação no uso de materiais ou de tecnologias e materiais especializados, ainda mais acentuado para edifícios de alto desempenho, como os NZEB (Nearly Zero Energy Buildings). Esses achados reforçam a importância de considerar simultaneamente as emissões operacionais e incorporadas, evitando compensações ilusórias. Na prática, para a neutralidade de GEE no ciclo de vida de edificações, são necessárias compensações ex-situ e emissões

operacionais suficientemente negativas para compensar o impacto incorporado. Focar apenas em reduzir emissões operacionais é insuficiente para atingir a neutralidade climática em qualquer cidade.

Segundo, para o caso específico de São Paulo. O PlanClima (São Paulo, 2021) define dois cenários: o Incondicional prevê redução de 20% das emissões operacionais até 2030, sem apoio externo; o Condicional propõe redução de 50%, com suporte adicional. Ambos projetam neutralidade para 2050. Ao analisar essas metas sob três trajetórias de crescimento — tendência atual, +50% e -50% — observa-se que, no cenário Incondicional, as emissões em 2030 permanecem próximas às de 2017; no Condicional, caem pela metade. No entanto, ao incluir as emissões incorporadas, os totais aumentam significativamente, comprometendo as metas traçadas (Figura 11). Vale ressaltar que os dados de 2017 referem-se apenas às emissões operacionais, o que gera incertezas quanto à representatividade atual diante da expansão do estoque construído e dos avanços tecnológicos recentes.

Embora o Acordo de Paris trate a neutralidade de forma absoluta, São Paulo atualmente adota os níveis de 2017 como referência para atingir esse marco até 2050, podendo representar um desvio importante em relação ao compromisso global e merece reconsideração o mais rapidamente possível.

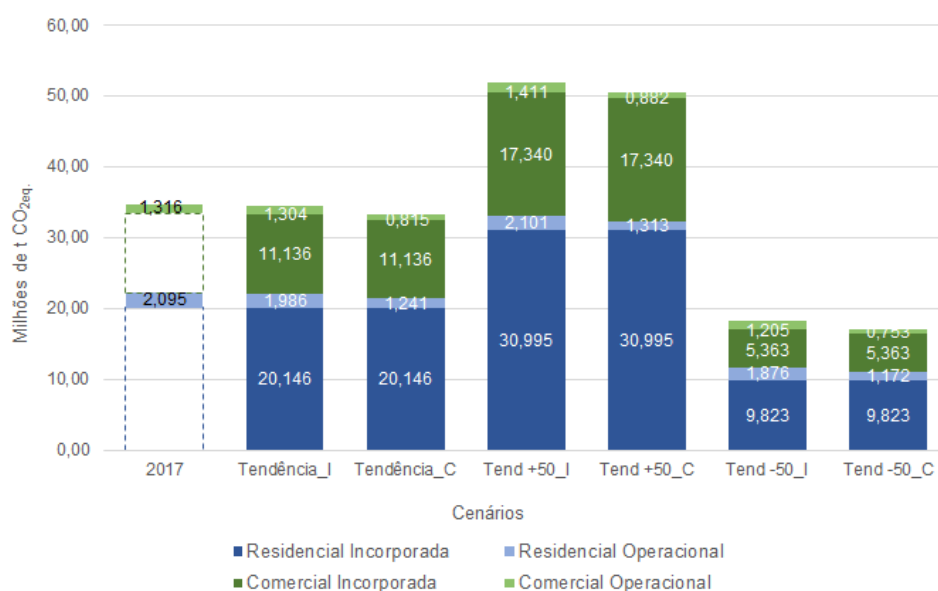


Figura 11 - Projeção de emissões operacional e incorporada da cidade de São Paulo. Fonte: Autores (2025).

Diante disso, torna-se urgente a implementação de políticas públicas que incluam expressamente as emissões incorporadas, com ações efetivas ainda nesta década para gerar efeitos mensuráveis até 2050.

Os resultados deste estudo também demonstram o valor de métodos simplificados para estimativas de emissões, fundamentais para apoiar decisões em contextos urbanos amplos. Como argumentam Allacker et al. (2019), há um equilíbrio necessário entre a precisão dos dados e sua utilidade prática: enquanto modelos altamente detalhados são úteis em análises específicas, abordagens por arquétipos ganham relevância por viabilizar avaliações estratégicas em larga escala.

A modelagem por arquétipos permite simular impactos de políticas em diferentes configurações tipológicas e níveis de aplicação, sendo uma ferramenta eficaz para o planejamento urbano e a formulação de políticas climáticas.

Röck (2023), por exemplo, desenvolveu um método semelhante com base na plataforma SLiCE, utilizando arquétipos derivados do projeto europeu TABULA para simular cenários futuros de emissões. A extrapolação por área de piso construída viabiliza a transição da escala micro para a macro, permitindo análises nacionais.

No Brasil, no entanto, ainda não há uma estrutura consolidada de arquétipos construtivos, lacuna que este estudo busca preencher ao propor e aplicar arquétipos urbanos adaptados à realidade nacional. Essa iniciativa contribui para gerar estimativas mais acessíveis e alinhadas ao contexto brasileiro. Mapear arquétipos regionais é também essencial, dada a diversidade nas técnicas construtivas, materiais e condições climáticas do país. A criação de uma base de dados adaptada a essas especificidades permitirá previsões mais precisas e embasará políticas públicas mais eficazes e territorialmente coerentes com a realidade nacional.

Conclusões

Este estudo apresentou uma metodologia híbrida baseada em arquétipos construtivos para estimar as emissões de GEE incorporadas no ambiente urbano, com foco em apoiar políticas públicas de descarbonização. A abordagem demonstrou robustez mesmo em contextos de dados limitados, destacando-se pela replicabilidade e pelo potencial de aplicação imediata.

Entre os principais avanços, destacam-se: (i) a definição de arquétipos localmente representativos e replicáveis, obtidos a partir de legislações urbanísticas, dados de mercado e caracterização material das edificações; (ii) a demonstração de que insumos-chave podem ser preditos com apenas duas variáveis geométricas básicas (área do pavimento-tipo e área construída total), viabilizando estimativas em larga escala com baixo custo de dados; (iii) o fornecimento de benchmarks por tipologia, compatíveis com referências internacionais, úteis para planejamento urbano e regulação; (iv) a quantificação de incertezas por tipologia, com definição de faixas realistas de aplicação e orientação para refinamentos futuros; e (v) o estabelecimento de uma ponte operacional entre micro e macroescala, permitindo estimar emissões do estoque urbano com granularidade suficiente para subsidiar zoneamento, códigos de obra e compras públicas de baixo carbono.

A estratégia integrada mostrou-se particularmente eficaz em São Paulo, mas é replicável em outros contextos urbanos, incluindo aqueles com baixa disponibilidade de dados, nos quais imagens de satélite oferecem uma alternativa prática de caracterização. O desvio médio de $\pm 25\%$ obtido nas estimativas encontra respaldo na literatura e tende a ser reduzido com a ampliação da base de dados regionais.

O contraste com estudos internacionais evidencia a carência de análises em escala urbana em países em desenvolvimento e reforça a relevância da definição de arquétipos regionais como fundamento para políticas climáticas mais assertivas. Ao incluir explicitamente as emissões de GEE incorporadas, esta metodologia amplia a base científica necessária para o monitoramento da neutralidade climática, revelando as limitações de abordagens que consideram apenas as emissões operacionais, como no caso da política climática de São Paulo (PlanClima).

Assim, o trabalho contribui para o avanço metodológico e fornece instrumentos concretos para gestores urbanos e formuladores de políticas, fortalecendo o alinhamento das cidades brasileiras às exigências globais de mitigação das mudanças climáticas.

Declaração de disponibilidade de dados

O conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste artigo está disponível no SciELO DATA e pode ser acessado em <https://doi.org/10.48331/SCIELODATA.WISSLC>.

Referências

- ABNT (2021). *NBR 15575-1 - Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. 5a ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas.
- Allacker, K., Castellani, V., Baldinelli, G., Bianchi, F., Baldassarri, C., & Sala, S. (2019). Energy simulation and LCA for macro-scale analysis of eco-innovations in the housing stock. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(6), 989–1008. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1548-3>
- Brasil (2023). *Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR): Painel de destinação RSU e RCC*. Ministério Do Meio Ambiente. Recuperado em 12 de novembro de 2023, de <https://sinir.gov.br/paineis/destinacao/>
- Callegari-Jacques, S. M. (2003). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre: Artmed.
- CEN (2011). *EN 15978 - Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CEN (2019). *EN 15804:2012 + A2:2019 - Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Colleto, G. M., & Gomes, V. (2021). Review of archetype development strategies for energy assessment at urban scale. In *Crossing Boundaries - CB'21* (v. 1. p. 1). Parkstad: Crossing Boundaries 2021.
- Evangelista, P. P. A. (2017). *Desempenho ambiental na construção civil: Parâmetros para aplicação da avaliação do ciclo de vida em edificações residenciais brasileiras* (Tese de doutorado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Gomes, V., Zara, O. O. C., Colleto, G. M., & Silva, M. G. (2022). Clustering Strategies for Defining Archetypes to Support Integrated Simulations of Environmental Impacts. In: *SBE22 Berlin - Sustainable Built Environment D-A-C-H Conference 2022 | Built environment within planetary boundaries*. Berlin: IOP Science.
- Hirota, E. H. (1987). *Estudo exploratório sobre a tipificação de projetos de edificações, visando a reformulação da norma brasileira NB-140/65* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 1435. Recuperado em 07 de março de 2024, de <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change - Technical Summary*. P. 102. Recuperado em 07 de março de 2024, de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_TechnicalSummary.pdf

ISO (2006a). *ISO 14040 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Switzerland: International organization for standardization.

ISO (2006b). *ISO 14044 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. Switzerland: International organization for standardization.

ISO (2022). *ISO 21931-1 - Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment - Part 1: Buildings*. Switzerland: International organization for standardization.

KPMG (2023). *Embodied carbon management for global infrastructure*. P. 34. Recuperado em 19 de março de 2024, de <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/in/pdf/2023/03/embodied-carbon-management-for-global-infrastructure.pdf>

Lanau, M., Liu, G., Kral, U., Wiedenhofer, D., Keijzer, E., Yu, C., & Ehlert, C. (2019). Taking Stock of Built Environment Stock Studies: Progress and Prospects. *Environmental Science and Technology*, 53(15), 8499–8515. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06652>

Loga, T., Stein, B., & Diefenbach, N. (2016). TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy and Buildings*, 132, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>.

Mastrucci, A., Marvuglia, A., Leopold, U., & Benetto, E. (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 316–332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.060>

Morales, M. F. D., Reguly, N., Kirchheim, A. P., & Passuello, A. (2020). Uncertainties related to the replacement stage in LCA of buildings: A case study of a structural masonry clay hollow brick wall. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119649>

Nanni, L. F. (1981). *Análise Estatística de dados com o uso de técnicas computacionais* (Caderno Técnico do Curso de Pós-graduação). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Oliveira, F. R. M. de. (2013). *Integração de indicadores de desempenho técnico-funcional, ambiental e econômico de sistemas estruturais verticais em concreto* (Tese de doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Otero, J. A. (2000). *Análise paramétrica de dados orçamentários para estimativa de custos na construção de edifícios - Estudo de caso voltado para a questão da variabilidade* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Parisotto, J. A. (2003). *Análise de estimativas paramétricas para formular um modelo de quantificação de serviços, consumo de mão-de-obra e custos de edificações residenciais - Estudo de caso para uma empresa construtora* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Pini (2008). *TCPO - Tabela de Composições de Preços para Orçamentos - Engenharia Civil, Construção e Arquitetura* (13ª ed.). São Paulo: Pini.

Pulgrossi, L. M. (2020). *Influência das regras de corte nos resultados de avaliação do ciclo de vida de edificações completas* (Dissertação de mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Reguly, N., Morales, M., Kirchheim, A. P., & Passuello, A. (2018). Incertezas relacionadas à etapa de manutenção de edificações habitacionais: Estudo de caso de paredes de alvenaria estrutural. In GCV2018: Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida (p. 270–276). Brasília: Ibict.

Röck, M., Baldereschi, E., Verellen, E., Passer, A., Sala, S., & Allacker, K. (2021). Environmental modelling of building stocks – An integrated review of life cycle-based assessment models to support EU policy making. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 151, 111550. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-638476/v1>

Röck, M., Saade, M., Balouktsi, M., Rasmussen, F., Birgisdóttir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>

Röck, M. (2023). *Building Data Models for Scalable High-Definition Life Cycle Assessment* (Tese de doutorado). KU Leuven University e TU Graz University, Cologne, Alemanha.

São Paulo (2021). PlanClima SP - Plano de Ação Climática do Município de São Paulo 2020-2050: Sumário Executivo. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo. Recuperado em 20 de abril de 2024 de https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/Sum_ExecutivoSP_Baixa.pdf

Secovi-SP (2024). *Anuário do Mercado Imobiliário 2023*. São Paulo: Secovi-SP. Recuperado em 19 de maio de 2024, de <https://secovi.com.br/pesquisas-e-indices/#anuario-do-mercado-imobiliario>

SINAPI (2025). *Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil - SINAPI - Sumário de publicações*. CAIXA / IBGE. Recuperado em 02 de fevereiro de 2025, de <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>

SMUL (2022). *Uso e ocupação do solo – Dados*. Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento. Prefeitura da Cidade de São Paulo. Recuperado em 27 de abril de 2024, de https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/licenciamento/desenvolvimento_urbano/dados_estatisticos/info_cidade/ambiente_construido/edificacao/index.php

Szalay, Z. (2024). A parametric approach for developing embodied environmental benchmark values for buildings. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 29, 1563–1581. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02322-w>

Teixeira, C. A., Invidiata, A., Sorgato, M. J., Melo, A. P., Fossati, M., & Lamberts, R. (2015). *Levantamento das características de edifícios residenciais brasileiros*. CB3E - Centro brasileiro de eficiência energética em edificações. https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio_TipologiasResidenciais.pdf

Trigaux, D., Allacker, K., & Debacker, W. (2021). Environmental benchmarks for buildings: a critical literature review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01840-7>

UNEP (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction*. Recuperado em 22 de abril de 2024, de <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>

UNFCCC (2015). *Paris Agreement*. Recuperado em 9 de novembro de 2023, de https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

Wiik, M. K. (2025). Developing whole-life carbon benchmark values for Norwegian buildings. *Building Research and Information*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/09613218.2024.2445843>

Zara, O. O. D. C., Guimarães, G. D., Zibetti, M., Pompermayer, K., Leite, I., & Gomes, V. (2020). Balancing data requirement and modelling quality in neighbourhood life cycle assessments. In: *Beyond2020 - World Sustainable Built Environment Conference*. Gothemburg: Beyond2020.

Železná, J., Felicioni, L., Trubina, N., Vlasatá, B., Růžička, J., & Veselka, J. (2024). Whole Life Carbon Assessment of Buildings: The Process to Define Czech National Benchmarks. *Buildings*, 14(7), 1936. <https://doi.org/10.3390/buildings14071936>.

Editor responsável: Luciene Pimentel da Silva

Recebido: 05-May-2025

Aprovado: 23-jan.-2026