

## 743 – BENEFÍCIOS AMBIENTAIS DAS PAREDES VERDES: ESTADO DA ARTE DOS ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### Felippe Benavente Canteras <sup>(1)</sup>

Tecnólogo em Saneamento Ambiental (CESET/UNICAMP), mestre e doutor em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (FEC/UNICAMP), ambos na área de Saneamento Ambiental. Atualmente é Professor Doutor da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, atuando junto aos cursos de Engenharia Ambiental, Tecnologia em Saneamento Ambiental e Engenharia de Transportes, bem como no Programa de Pós-graduação em Tecnologia, na área de concentração em Ambiente.

### Beatriz Leão Evangelista de Lara <sup>(1)</sup>

Tecnóloga em Controle Ambiental pela Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas (FT/UNICAMP). Mestre em Tecnologia pela FT/UNICAMP. Analista em Avaliação do Ciclo de Vida da EnCiclo Soluções Sustentáveis. Doutoranda em Tecnologia na FT/UNICAMP

### Carmenlucia Santos Giordano Penteado <sup>(1)</sup>

Engenheira Química pela Universidade Federal do Paraná, mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos, e doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professora Livre Docente da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, onde atua junto aos cursos de graduação em Tecnologia em Saneamento Ambiental e Engenharia Ambiental, e no Programa de Pós-graduação em Tecnologia, na área de concentração em Ambiente.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Rua Paschoal Marmo, 1888 – Jardim Nova Itália – Limeira – SP – CEP: 13484332 – Brasil – Tel: +55(19) 2113-3339 - e-mail: [canteras@unicamp.br](mailto:canteras@unicamp.br)

## RESUMO

As paredes verdes (PV) são infraestruturas que têm ganhado atenção devido aos seus múltiplos benefícios ambientais e sociais, entretanto, estudos que considerem os impactos ambientais do ciclo de vida desta infraestrutura ainda são escassos. Assim, este artigo apresenta uma revisão de literatura sobre os estudos publicados que utilizam a ferramenta metodológica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a fim de identificar as tendências, lacunas do conhecimento e perspectivas futuras. Para isso, foi realizada uma busca nas bases de dados *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*. Os resultados apontam que as PV geram menores impactos ambientais comparadas às paredes convencionais. Dentre as classificações de PV, as paredes vivas foram as mais abordadas nos estudos. A etapa de produto foi identificada como a que gera os maiores impactos ambientais em comparação às outras etapas do ciclo de vida, devido à escolha dos materiais utilizados para construção. Mais estudos precisam ser realizados, considerando cenários reais de diversos lugares do mundo, a fim de assegurar a inserção desta tecnologia, uma vez que a produção científica fornece embasamento para os tomadores de decisão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impactos Ambientais. Construção Sustentável. Sistemas Construtivos. Paredes Vivas. Fachadas Verdes.

## INTRODUÇÃO

A densificação urbana tem aumentado nas últimas décadas, ocasionando pressão sobre as infraestruturas urbanas e impactos negativos nas condições sociais e ambientais. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2019), mais da metade da população mundial vive em centros urbanos, e as projeções mostram um acréscimo de 2.5 bilhões de pessoas até 2050, o que significará 2/3 da população mundial. Embora as cidades ocupem apenas 3% do território global, o meio urbano consome entre 60 e 80% de toda a energia, é responsável por 75% das emissões de carbono, e consome mais de 60% dos recursos naturais disponíveis no planeta (FAO, 2019). Como resultado, verificam-se impactos no clima, os quais podem ser notados através da formação de ilhas de calor, inundações repentinas e degradação da qualidade da água (SHAFIQUE *et al.*, 2020), além da poluição sonora. Todos esses fatores interferem na saúde e bem-estar da população (YSEBAERT *et al.*, 2021).

Logo, é crescente a demanda por práticas sustentáveis no meio urbano, em especial no que se refere às edificações e infraestruturas utilizadas para as diversas atividades, a fim de amenizar os impactos mencionados. Neste contexto, as infraestruturas verdes se destacam pelo seu potencial mitigador desses impactos, pois representam soluções multifuncionais, baseadas na natureza, que prestam serviços ambientais e ecossistêmicos, tendo a capacidade de atuar em mais de um problema simultaneamente (SEIWERT; RÖBLER, 2020). Como exemplos de infraestruturas verdes podem ser citados os corredores verdes, pavimentos drenantes, telhados verdes, paredes verdes, hortas urbanas e comunitárias, cinturões verdes, parques públicos, jardins de chuva, canteiros pluviais, biovaletas, entre outros. Dentre os benefícios e serviços ambientais prestados através desta adaptação dos espaços urbanos pode-se citar a mitigação das mudanças climáticas, melhoria na gestão de risco de desastres naturais, a provisão de alimentos, a redução no consumo de energia, a conservação da biodiversidade, a promoção de saúde e bem-estar para a população, a criação e manutenção de espaços para recreação, valorização econômica das propriedades (CHATZIMENTOR *et al.*, 2020).

As paredes verdes são sistemas que possibilitam a presença de vegetação para cobertura de fachadas de edifícios e, embora possam apresentar diversas terminologias e nomenclaturas bastante próximas, como jardins verticais, sistemas de vegetação vertical, biowall, os dois sistemas que mais se destacam são as fachadas verdes e as paredes vivas, os quais não são sinônimos, visto que se diferenciam pelas espécies vegetais e pela estrutura de suporte utilizada para o desenvolvimento das plantas (EL MENSRAWY *et al.*, 2022).

As fachadas verdes utilizam espécies trepadeiras lenhosas, herbáceas ou pendentes, de crescimento ascendente ou descendente, e são utilizadas para recobrir uma determinada superfície vertical. São categorizadas de acordo com a superfície de adesão das espécies vegetais, podendo ser fachadas diretas, nas quais as plantas aderem diretamente à parede do edifício, ou indiretas, quando as plantas se desenvolvem em estruturas de apoio adjacentes à parede do edifício, como arames, telas ou treliças (BARBOSA; FONTES, 2016; YSEBAERT *et al.*, 2021). Essas fachadas geralmente têm cobertura superficial lenta e incluem uma seleção limitada de plantas (MANSO *et al.*, 2021).

Já as paredes vivas caracterizam-se pela utilização de painéis ou módulos que podem ser fixados diretamente nas paredes do edifício, ou em estruturas verticais independentes (assim como as fachadas direta e indireta, respectivamente), sustentando o crescimento vegetal. A diferença é que estes painéis possibilitam o enraizamento vegetal no substrato suspenso, podendo ser utilizados vasos, jardineiras e suportes que fornecem uma maior liberdade na escolha das espécies vegetais, permitindo o cultivo ao longo de toda extensão da superfície vertical (EL MENSRAWY *et al.*, 2022). Dessa forma, as paredes vivas são soluções viáveis para edifícios mais altos, em que as trepadeiras utilizadas nas fachadas verdes certamente não seriam capazes de cobrir toda superfície partindo do solo (MANSO; CASTRO-GOMES, 2015). Geralmente as paredes vivas permitem um crescimento de vegetação mais uniforme ao longo da superfície do edifício e aplicação de uma variedade maior de plantas (MANSO *et al.*, 2021).

Dentre os benefícios da utilização de PV, no âmbito de uma cidade destacam-se: a inserção de vegetação no meio urbano sem ocupar qualquer espaço ao nível da rua e, se inseridas em uma escala significativa, podem melhorar o ambiente urbano a partir da retenção de águas pluviais e remediação de águas cinzas (LAKHO *et al.*, 2021), da melhoria de qualidade do ar (VIECCO *et al.*, 2021), aumentando e dando suporte à biodiversidade urbana (MAYRAND; CLERGEAU, 2018), reduzindo a temperatura e mitigando os efeitos de ilhas de calor (SUSCA *et al.*, 2022). Além dos benefícios ambientais, estes sistemas estimulam o usufruto de áreas urbanas, têm efeito terapêutico ao induzirem um bem-estar psicológico pela presença de vegetação e melhoram a estética das cidades (MANSO; CASTRO-GOMES, 2015).

Em escala de edificação, a vegetação das PV tem o potencial de melhorar o microclima tanto no inverno (funcionando como uma camada de isolamento complementar), como no verão (fornecendo sombra e efeito de resfriamento evaporativo); além disso, a vegetação absorve grandes quantidades de radiação solar, e o efeito de evapotranspiração reduz ainda mais o impacto da radiação, aumentando os níveis de umidade e diminuindo a temperatura superficial da parede (SUSCA *et al.*, 2022).

Estudos de revisão de literatura tem sido realizados a fim de promover informações e disseminar o uso das PV, como o estudo de Manso e Castro-Gomes (2015), que avaliou as principais características e tecnologias dos diferentes tipos de PV; Charoenkit e Yiemwattana (2016) e Jesus *et al.* (2017), que avaliaram aspectos

relacionados ao desempenho térmico dessas infraestruturas; Riley (2017) trouxe uma visão otimizada das PV para auxiliar na disseminação do uso, e desmistificar a visão de que são tecnologias caras, complicadas e apenas decorativas. Bustami *et al.* (2018) revisaram os estudos publicados sobre PV dividindo-os em 13 diferentes temas, a fim de verificar as tendências de pesquisas. Ysebaert *et al.* (2021) revisaram os efeitos das PV para mitigar a poluição por material particulado no meio urbano, enquanto Manso *et al.* (2021) abordaram aspectos relacionados aos benefícios e custos das paredes e telhados verdes.

Além dos benefícios, a estimativa dos impactos ambientais a partir de uma perspectiva do ciclo de vida é crucial para avaliar o desempenho geral das PV. Neste contexto, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser uma ferramenta útil para compreender o desempenho ambiental de tais sistemas de uma forma mais abrangente.

A ACV é uma metodologia que possibilita avaliar os aspectos e potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, desde a aquisição de matéria-prima até a fabricação, uso e fim de vida. O desenvolvimento de um estudo de ACV é realizado por meio de quatro etapas: (i) definição do objetivo e escopo, (ii) análise de inventário do ciclo de vida, (iii) avaliação de impacto ambiental, e (iv) interpretação. As etapas da ACV são interativas e podem ser adaptadas durante a elaboração do estudo (ABNT 2009a, 2009b).

O objetivo especifica a aplicação pretendida do estudo, os motivos da sua realização, o público-alvo e se as descobertas serão divulgadas ao público (JAIN *et al.*, 2020). O escopo deve ser bem definido para garantir que a abrangência, o detalhamento e a profundidade do estudo sejam suficientes e compatíveis com o objetivo declarado (ABNT, 2009a). O inventário do ciclo de vida (ICV) envolve a quantificação das entradas e saídas de cada processo dentro da fronteira do sistema (ABNT, 2009a). A avaliação de impacto ambiental (AICV) tem como objetivo estudar a significância dos potenciais impactos ambientais, utilizando os resultados do ICV. Esse processo relaciona os dados de inventário com as categorias e indicadores de impactos específicos, a fim de entender esses impactos e proporcionar informações para a etapa de interpretação (ABNT, 2009a). A etapa de interpretação envolve a identificação de questões importantes com base nos resultados das etapas anteriores do estudo, em conjunto com a avaliação em comparação com o objetivo e escopo, visando fornecer as conclusões, limitações e recomendações do estudo. Além disso, inclui as análises de completudeza, sensibilidade e consistência (ABNT, 2009b).

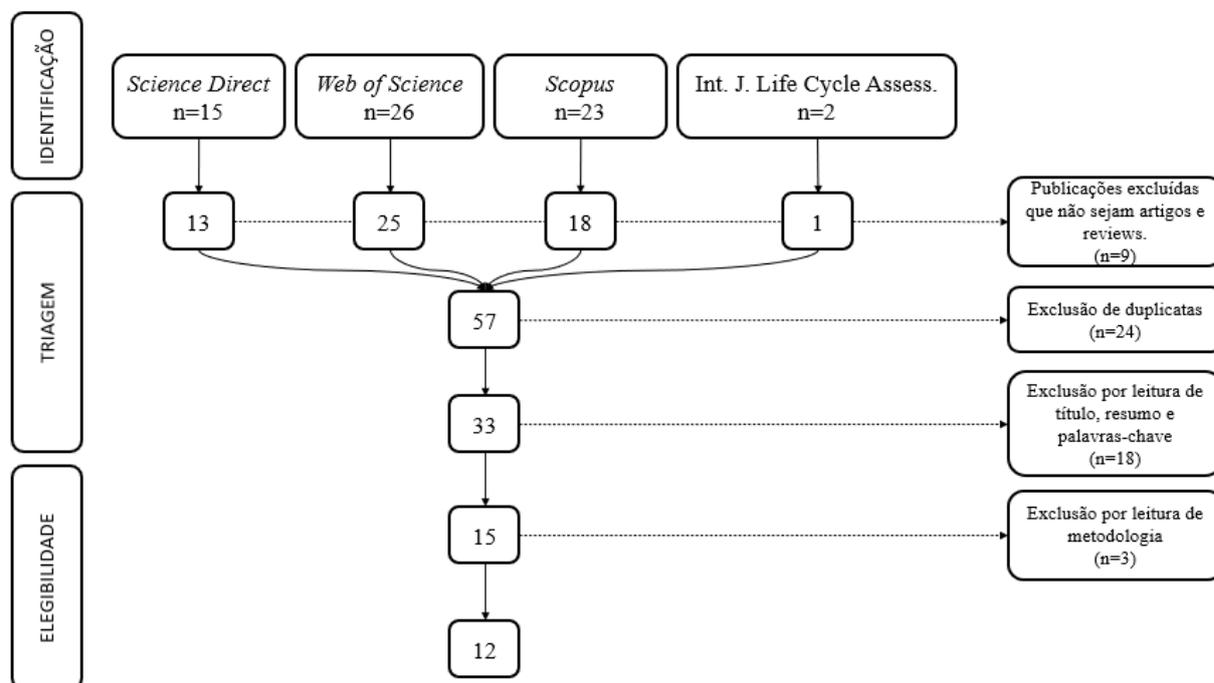
Considerando as demandas ambientais do ambiente construído, as quais não se restringem a instalar uma infraestrutura verde e considerar seus serviços ambientais, mas também envolvem uma avaliação sistemática dos reais benefícios ambientais, a partir de uma abordagem de ciclo de vida, este estudo tem por objetivo identificar, por meio de uma revisão sistemática da literatura especializada, os aspectos decisivos e importantes da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) na mensuração dos benefícios e impactos ambientais decorrentes da manufatura, instalação, uso e pós-uso de paredes verdes (PV) em edificações.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar o estado da arte de publicações sobre Avaliação do Ciclo de Vida aplicada às Paredes Verdes, os seguintes procedimentos foram adotados:

- A revisão sistemática de literatura foi realizada nas bases de dados Science Direct, Web of Science e Scopus utilizando a string de busca: (“*life cycle assessment*” OR “*LCA*”) AND (“*green wall*” OR “*living wall*” OR “*vertical garden*” OR “*vertical greening systems*” OR “*green vertical systems*” OR “*vertical greenery systems*”).
- Na base de dados Science Direct, a busca foi realizada no item ‘*advanced search: Title, abstract or author-specified keywords*’; na Web of Science foi utilizada a busca por tópico; na Scopus por ‘*Article title, abstract, keyword*’.
- Foi realizada uma busca específica no *International Journal of Life Cycle Assessment*, utilizando a mesma string de busca, a fim de garantir a inclusão de publicações focadas principalmente no objetivo desta revisão.
- Depois de identificar potenciais publicações foi iniciada um processo de filtro para selecionar os estudos focados na metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida aplicada às Paredes Verdes (Figura 1).

- Somente publicações em inglês foram incluídas no escopo desta revisão.
- O período compreende os anos de 2011 (primeira publicação identificada), e outubro de 2021.



**Figura 1. Estrutura metodológica da revisão de literatura.**

Uma análise dos artigos selecionados foi realizada a fim de identificar os principais temas abordados em cada artigo. Foram analisadas as seguintes características gerais e específicas da ACV:

- Características gerais: ano de publicação, jornal, tipo de estudo, país de origem do primeiro autor, objetivo do artigo, tipo de PV e se foi utilizada a ACV como ferramenta metodológica;
- Características da ACV: unidade funcional, vida útil da PV, fronteira do sistema, tipo e fonte de dados, método de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV), categorias de impacto e software utilizado.

Após leitura completa dos artigos, alguns foram excluídos do escopo deste estudo, por não abordarem PV e ACV (KIM *et al.*, 2016), por não apresentarem o desenvolvimento completo da ACV como pedem as normas ABNT 14.040 e 14.044 (KIO; ALI, 2021), e por não tem o foco metodológico no desenvolvimento de uma ACV (PEARLMUTTER *et al.*, 2021).

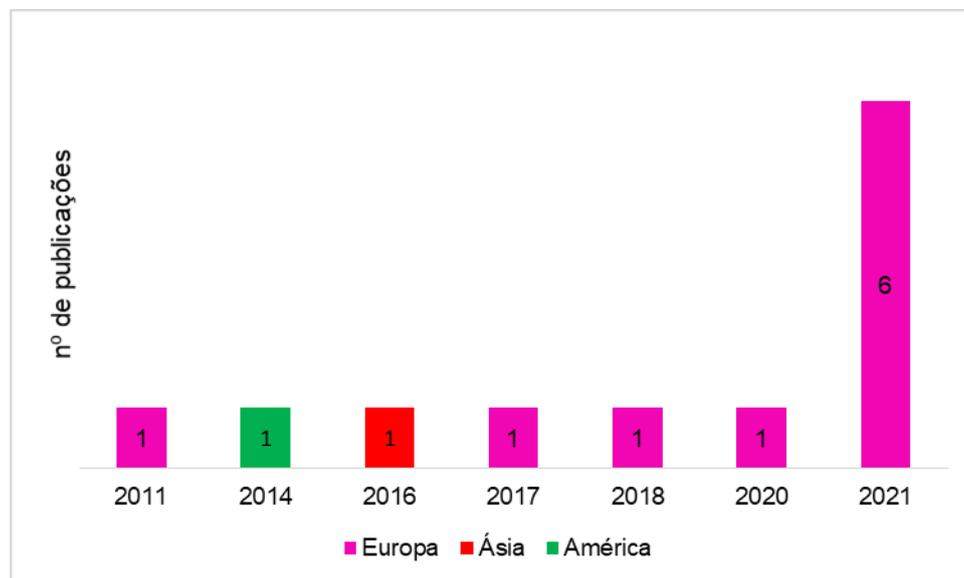
## RESULTADOS

Ao analisar a evolução temporal das publicações (Figura 2), é possível verificar a atualidade e o crescimento do interesse pelo tema, visto que o primeiro estudo de ACV envolvendo PV foi publicado em 2011, e 50% dos estudos foram publicados no ano de 2021, mesmo considerando apenas os artigos publicados até outubro. O continente Europeu representa 83% das publicações, sendo Portugal e Itália os países com o maior número (3), seguidos de Espanha (2), Holanda (1) e Reino Unido (1). O continente asiático é representado por Hong Kong e o continente americano pelo Canadá. Conforme destacam Akinwolemiwa *et al.* (2018), as PV são usadas e pesquisadas principalmente em países desenvolvidos a fim de maximizar o conforto térmico interno dos edifícios. Dentre os periódicos analisados, *Building and Environment* e *Energy and Buildings* são os que apresentaram o maior número de publicações relacionadas (3 publicações cada); as outras publicações são provenientes dos periódicos *Journal of Cleaner Production*, *Science of the Total Environment*, *Journal of Environmental Management*, *Environmental Challenges* e *Sustainability*.

Os principais objetivos encontrados nos estudos de ACV analisados foram: comparar os impactos ambientais de paredes convencionais e PV (OTTELÉ *et al.*, 2011; BLANCO *et al.*, 2021; CHÀFER *et al.*, 2021); comparar emissões de compostos químicos e consumo de energia das PV e os ganhos provenientes da

purificação do ar e ganhos de energia (FENG; HEWAGE 2014); analisar os impactos ambientais das PV e ganhos de energia (PAN; CHU, 2016; COSOLA *et al.*, 2020; PERINI, *et al.*, 2021); analisar os impactos ambientais de PV que contém resíduos industriais em sua composição (MANSO *et al.*, 2018; CORTÊS *et al.*, 2021a; CORTÊS *et al.*, 2021b); analisar as emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes de sistemas de PV (SALAH; ROMANOVA, 2021), e o desenvolvimento de um novo módulo de paredes vivas com ênfase na escolha dos materiais (SERRA *et al.*, 2017).

Quanto aos tipos de PV, verificou-se que o sistema de paredes vivas foi o mais abordado, sendo a subcategoria 'modular' a mais investigada (presente em 9 dos 12 artigos), seguida da subcategoria 'contínua' (presente em 5 dos 12 artigos). As fachadas verdes foram investigadas em menor escala, sendo utilizadas em 2 dos 7 artigos para sistema indireto, e apenas 1 vez para sistemas diretos. Isso pode ser explicado pelo fato de as fachadas verdes serem soluções mais simples, que demandam menos materiais e permitem o uso de plantas trepadeiras; já as paredes vivas demandam o desenvolvimento de estrutura de sustentação e uma quantidade maior de materiais no processo construtivo, além de uma ampla variedade de plantas, para que ocorra um crescimento uniforme na superfície (MANSO; CASTRO-GOMES 2015).



**Figura 2. Evolução temporal das publicações de ACV aplicadas à PV.**

A caracterização dos estudos quanto aos aspectos da ACV teve como foco a clareza dos estudos quanto as etapas determinadas pelas normas ABNT 14.040:2009 e 14.044:2009.

Na etapa de definição do objetivo e escopo, foram analisadas a unidade funcional, a fronteira do sistema e a vida útil das PV. A unidade funcional serve como uma referência para quantificar o desempenho do sistema (PAN; CHU, 2016) e permite a comparação de todos os dados de inventário e impactos ambientais na estruturação da ACV (ABNT, 2009a), enquanto a fronteira delimita quais processos são considerados dentro do sistema. Na etapa de Análise do Inventário do Ciclo de Vida, foi verificada a origem dos dados utilizados nos estudos. Na etapa de Avaliação de Impacto Ambiental, foram analisados o método, as categorias de impacto e os softwares utilizados.

Todos os estudos utilizaram como unidade funcional a área superficial (m<sup>2</sup>), e conforme destacam Shafique *et al.* (2020) essa unidade funcional permite alta transparência ao comparar diferentes práticas de vegetação em diferentes estudos; os autores destacam que a unidade funcional deve ser clara para que os resultados comparativos possam fornecer informações úteis para o trabalho de pesquisa.

A vida útil está relacionada com a duração dos componentes das PV, e conseqüentemente com a frequência de substituição durante o uso e manutenção. Pouco mais da metade dos estudos (58%) definiram 50 anos para a vida útil das PV. Otelé *et al.* (2011) destacam que a vida útil de uma parede convencional é de 50 anos, portanto, adotaram a mesma vida útil para a parede verde, servindo de referência para os estudos seguintes.

Blanco *et al.* (2021) adotaram 30 anos como período de vida útil, e levaram em consideração o período de degradação dos materiais e não o fim de vida das PV. Cosola *et al.* (2020) e Salah e Romanova (2021) destacam que em 10 anos, todos os componentes de uma PV deveriam ser trocados, e adotaram este período como vida útil das PV analisadas, assim como Perini *et al.* (2021), que consideraram 10 anos em conformidade com as especificações dos fabricantes, e assumiram um cenário alternativo máximo de 25 anos. Serra *et al.* (2017) não definiram a vida útil em seu estudo, visto que não analisaram a etapa de uso e manutenção das PV.

A determinação da vida útil deve ser considerada principalmente quando se analisa a etapa de uso e manutenção das PV no estudo de ACV, pois essa variável influencia na quantidade de substituições dos componentes. Porém, padronizar a vida útil não é tarefa fácil, pois diversos fatores interferem na durabilidade: materiais utilizados, parede estrutural na qual a PV será inserida, e especificações dos componentes. Assim, ao levar em conta a vida útil no estudo de ACV, permite-se avaliar o desempenho das PV, e identificar meios para diminuir os impactos ambientais da fase de produção. Salah e Romanova (2021) verificaram que para uma vida útil de 10 anos, o período de retorno ambiental varia de 4 a 6 anos, sendo os anos seguintes apenas de ganhos em benefícios ambientais. A Tabela 1 resume as principais características dos estudos analisados.

**Tabela 1. Características da ACV dos estudos analisados.**

Autores	Definição de objetivo e escopo*	Análise de Inventário do Ciclo de Vida		Avaliação de Impacto Ambiental	
	Vida útil (anos)	Dados primários	Dados secundários	Método de AICV	Software
Ottelé <i>et al.</i> (2011)	50	✓	Base de dados Dutch National Environmental	Base de dados Dutch National Environmental	-
Feng; Hewage (2014)	50	-	Literatura	Eco-indicator 99	SimaPro
Pan; Chu (2016)	50	-	Base de dados Gabi	CML-2001	Gabi
Serra <i>et al.</i> (2017)	-	-	Literatura	-	-
Manso <i>et al.</i> (2018)	50	✓	Literatura	CML-2001	Gabi
Cosola <i>et al.</i> (2020)	10	✓	Ecoinvent v.3.5	ILCD	SimaPro 8.5
Salah; Romanova (2021)	10	✓	Ecoinvent v3.6	CML-IA v.4.7	SimaPro 9.1
Cortês <i>et al.</i> (2021a)	50	✓	Literatura	-	-
Blanco <i>et al.</i> (2021)	30	✓	Ecoinvent v. 3.3	CML 2001	GaBi 8
Châfer <i>et al.</i> (2021)	50	-	Ecoinvent v3.7	ReCiPe2016 e IPCC 2013 (GWP)	
Cortês <i>et al.</i> (2021b)	50	-	Ecoinvent v3.6 e literatura	CML-IA v.4.7	SimaPro
Perini <i>et al.</i> (2021)	10 e 25	✓	-	IPCC, CED	-

\* Todos os estudos consideraram como unidade funcional 1 m<sup>2</sup>.

A fronteira do sistema (Tabela 2) delimita as etapas consideradas para o desenvolvimento da ACV, considerando o sistema de produto das PV, sendo de fundamental importância, visto que a escolha destas etapas interfere diretamente na qualidade dos resultados. O sistema de produto das PV compreende as fases de extração de matéria prima, manufatura, transporte, construção, uso, manutenção e disposição. A abordagem que inclui todas estas etapas é denominada de 'berço ao túmulo'. 'Berço' significa o ponto de início, enquanto

o ‘túmulo’ significa o fim de vida/disposição de qualquer material ou produto em seu ciclo de vida (SHAFIQUE *et al.*, 2020).

**Tabela 2. Etapas da fronteira do sistema de PV consideradas nos estudos.**

	Extração de matéria prima	Manufatura	Transporte	Construção	Uso / Manutenção	Fim de vida
Ottelé et al. (2011)	x	x	x	x	x	x
Feng; Hewage (2014)	x	x	x	x	x	x
Pan; Chu (2016)	x	x	x		x	x
Serra et al. (2017)	x	x		x		
Manso et al. (2018)		x	x	x	x	
Cosola et al. (2020)		x	x	x	x	
Salah; Romanova (2021)		x	x	x	x	x
Cortês et al (2021a)	x	x	x	x	x	
Blanco et al. (2021)		x	x		x	x
Chàfer et al. (2021)		x		x	x	x
Cortês et al. (2021b)	x	x	x			
Perini et al. (2021)	x	x	x	x	x	x

A extração de matéria prima foi considerada em 58% dos estudos, enquanto a etapa de manufatura foi considerada em todos os estudos, visto que esta fase é de extrema importância quando analisa-se os materiais inseridos no processo construtivo das PV.

O transporte relaciona a distância entre o canteiro de obra e a localização geográfica do fornecimento dos materiais e, a distância entre o canteiro de obra e a destinação final. Esta etapa foi considerada na maior parte dos estudos, exceto em Serra *et al.* (2017), que consideraram a seleção dos materiais em escala regional e assim definiram que os impactos de transporte seriam insignificantes, e Chàfer *et al.* (2021), que não consideraram o transporte a fim de evitar desigualdades. Quanto aos cenários adotados, todos os estudos consideraram o transporte de materiais até o canteiro de obras, porém, apenas Feng e Hewage (2014), Salah e Romanova (2021) e Blanco *et al.* (2021) consideraram o transporte do canteiro de obra até a destinação final. Manso *et al.* (2018) apontam que o potencial de aquecimento global está diretamente relacionado à dependência de recursos fósseis na produção de energia e transporte. Assim, como a etapa de transporte gera grandes impactos decorrentes da queima do diesel, o uso de recursos que se localizam próximos ao canteiro de obra deveria ser prioridade.

A etapa de construção inclui o processo construtivo das PV, considerando os impactos ambientais principalmente do uso de máquinas e consumo de energia, sendo considerada em 75% dos estudos. Blanco *et al.* (2021) não consideraram a etapa de construção, pois alegam ter menor relevância em edificações residenciais. Cortês *et al.* (2021b) não consideraram a etapa de construção, uso e fim de vida devido à falta de dados quantitativos. Entretanto, é importante considerar o máximo de etapas do ciclo de vida possível dentro de uma ACV, para que a avaliação seja a mais próxima possível da realidade, trazendo maior confiabilidade nos resultados.

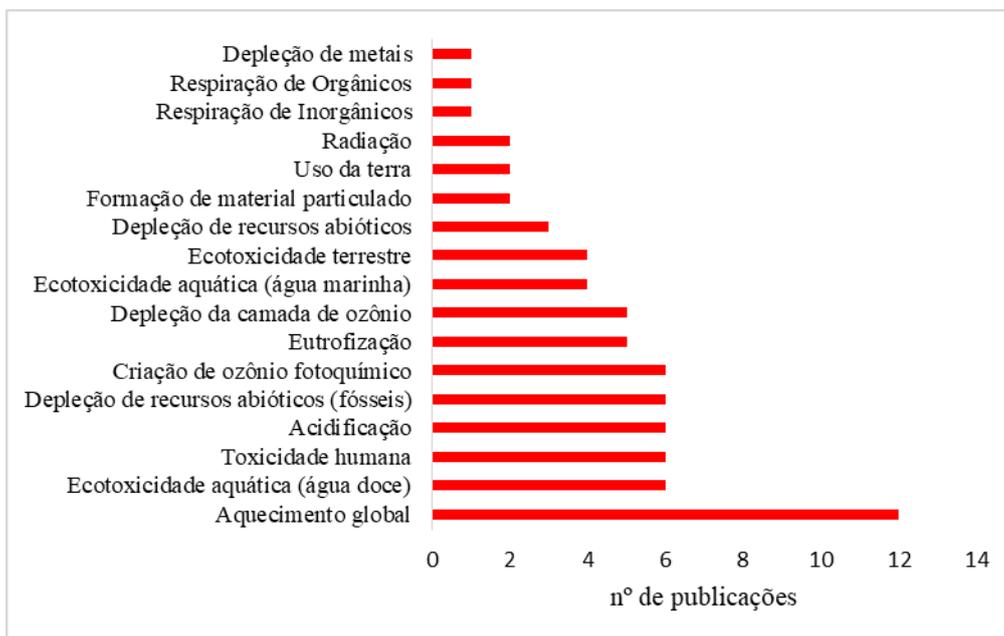
Já o uso e manutenção considera os fluxos de entradas e saídas que ocorrem durante o período operacional das PV. Nos estudos, o uso está relacionado principalmente com o conforto térmico e ganho energético com o uso das PV, e os impactos quanto ao sistema de irrigação; a manutenção refere-se a troca de materiais ao longo da vida útil das PV, e 83% dos estudos consideraram esta etapa.

O fim de vida na ACV consiste em assumir cenários de destinação, que podem envolver processos de reuso, reciclagem e/ou disposição final em aterro. Aproximadamente 58% dos estudos incluíram esta fase. Ottele *et al.* (2011) consideraram cenários de reuso e reciclagem; Feng e Hewage (2014) consideraram disposição em aterro; Pan e Chu (2016) consideraram reciclagem e a disposição em aterro; Salah e Romanova (2021) consideraram reciclagem e a compostagem; Blanco *et al.* (2021) consideraram o envio para aterro de todos os materiais; Chàfer *et al.* (2021) consideraram reciclagem e a disposição em aterro; Perini *et al.* (2021) consideraram reciclagem, compostagem, aterro e incineração.

Desta forma, pode-se afirmar que apenas 3 estudos consideraram a abordagem completa do ‘berço ao túmulo’, incluindo todas as etapas possíveis na ACV (OTTELE *et al.*, 2011; FENG; HEWAGE, 2014; PERINI *et al.*, 2021).

Na etapa de análise de inventário, 58% dos estudos utilizaram dados primários (Tabela 1), provenientes dos produtores dos materiais e distribuidores; em conjunto aos dados primários, os autores utilizaram dados secundários provenientes da literatura e banco de dados. Dentre os bancos de dados, o *Ecoinvent* foi o mais utilizado, estando presente em 45,5% dos estudos.

Já na etapa de Avaliação de Impacto Ambiental, alguns estudos não mencionaram o método utilizado, e dentre os que mencionaram, o método CML foi utilizado em 50% dos estudos (Tabela 1). Dentre as categorias de impacto analisadas nos estudos (Figura 3), aquecimento global foi utilizada em todos os estudos, pois é uma categoria relevante para este tipo de sistema, visto que a vegetação das PV interfere na absorção de gases em seu processo biológico, principalmente o CO<sub>2</sub>.



**Figura 3. Categorias de impacto analisadas nos estudos.**

## DISCUSSÃO

A partir da análise dos artigos, foi possível verificar que há um déficit de estudos de ACV aplicados à PV, principalmente no Brasil, onde nenhum estudo foi encontrado. Verificou-se que a maior parte dos estudos foram realizados no hemisfério norte, portanto, os reais impactos ambientais da utilização de PV no hemisfério sul são desconhecidos, visto que a utilização dessa tecnologia deve considerar os parâmetros geográficos. Assim, estudos que considerem cenários reais precisam ser realizados para disseminação do uso das PV.

Ao comparar as etapas do ciclo de vida das PV, notou-se que a fase de produto (extração de matéria-prima e manufatura) é a que gera os maiores impactos ambientais (PAN; CHU, 2018; COSOLA *et al.*, 2020; SALAH; ROMANOVA, 2021; CORTÊS *et al.*, 2021a), visto que nesta fase consideram-se os impactos ambientais provenientes de todo o processamento do material, considerando a energia e o CO<sub>2</sub> incorporados. Salah e Romanova (2021) encontraram que a fase de manufatura é responsável por 80,67% das emissões totais de CO<sub>2</sub>.

Além disso, um dos fatores que tornam esta fase do ciclo de vida significativa é a escolha do material utilizado para construção das PV, em especial os materiais de apoio/sustentação. Feng e Hawage (2014) analisaram que o sistema de sustentação das PV feito com policloreto de vinila (PVC) gera os maiores impactos ambientais comparados a outros materiais como polietileno de alta densidade e aço, principalmente pela alta emissão de carcinogênicos. Serra *et al.* (2017) identificaram que o uso de liga de alumínio reciclado (30%) foi o material que se destacou quanto à menor geração de impactos ambientais quando comparado com a liga produzida com matéria-prima virgem, apresentando uma redução de emissão de 33 kg de CO<sub>2eq</sub>/m<sup>2</sup>. Manso *et al.* (2018) encontraram que o material de sustentação (laje pré-moldada ativada por álcali) tem os maiores impactos em todas as categorias analisadas, pois demanda muita energia no processo de cura. Cosola *et al.* (2020) identificaram que o sistema de sustentação construído a partir de plástico gera os menores impactos ambientais em comparação ao sistema construído a partir de alumínio, devido ao número reduzido de materiais, e consequentemente menor consumo de energia no processo produtivo; entretanto, os autores não identificaram o tipo de plástico utilizado. Blanco *et al.* (2021) verificaram que os maiores impactos ambientais foram devido ao uso de estrutura de aço, ao passo que Cortês *et al.* (2021b) identificaram que o uso de metal como material de sustentação das PV e o uso de plástico como material dos módulos das plantas geram os maiores impactos ambientais.

Quanto aos impactos ambientais dos diferentes tipos de PV, verificou-se que as paredes vivas contribuem com os maiores impactos ambientais comparadas às fachadas verdes, por utilizarem mais materiais na sua composição. Diversos autores identificaram que o sistema de paredes vivas baseadas em camada de feltro são as mais impactantes (OTTELÉ *et al.*, 2011; FENG; HAWAGE, 2014; COSOLA *et al.*, 2020). Ottele *et al.* (2011) apontam que isso ocorre devido à impossibilidade de reciclar todo o módulo envolvido. Feng e Hawage (2014) verificaram que o sistema baseado em camada de feltro, comparado ao sistema de treliça e painel modular, é menos sustentável, pois o sistema com feltro precisa de até 23 anos para equilibrar as emissões lançadas, e consome 11 e 4 vezes mais energia do que o sistema de treliça e painel modular, respectivamente. Cosola *et al.* (2020) apontam que o sistema baseado em camadas de feltro gera maiores impactos comparado ao painel modular, principalmente pelo uso de alumínio na base de sustentação, além dos impactos gerados da produção de fertilizantes, já que esse sistema requer uma irrigação e controle de nutrientes mais assíduos. Blanco *et al.* (2021) compararam o desempenho ambiental de PV do tipo fachada verde indireta e construção convencional, e identificaram que a fachada verde gera maior carga ambiental, em função dos materiais utilizados; apenas as estruturas em madeira reduzem a pegada de carbono, enquanto estruturas de PVC e náilon produzem mais emissões de CO<sub>2</sub> do que as estruturas em aço. Cortês *et al.* (2021b) identificaram que as paredes vivas geram os maiores impactos ambientais e, quando adicionadas fachadas verdes e paredes vivas em uma parede convencional, os impactos aumentam 20% e 51%, respectivamente.

Logo, estes estudos demonstram que a escolha dos materiais para construção das PV interfere significativamente na geração dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dessas infraestruturas, e para que sejam consideradas efetivamente sustentáveis, a busca por materiais com os menores encargos ambientais se faz necessária. Neste sentido, Manso *et al.* (2018) desenvolveram um sistema de sustentação para PV modular a partir de resíduos e co-produtos industriais (lama residual de mina, vidro moído e cortiça preta expandida). Os autores identificaram que este sistema, em relação aos sistemas presentes na literatura, gera menores impactos ambientais para as categorias de aquecimento global, toxicidade humana e ecotoxicidade aquática (água doce), e a partir disso, demonstram que os sistemas de PV podem ser inovativos e a incorporação de estratégias ambientais como o uso de material reciclado ou resíduos industriais, os torna mais competitivos.

Ottelé *et al.* (2011) apontam que outras pesquisas são essenciais para aprimorar a análise das PV, principalmente para as categorias em que a quantificação da influência das PV seja complexa ou imensurável (saúde humana, melhoria na qualidade do ar, mitigação do efeito do calor urbano e aumento da biodiversidade), além da necessidade de apontar os benefícios econômicos, estéticos e sociais. Já Feng e

Hawage (2014) colocam que mais estudos devem ser feitos considerando a orientação dos edifícios, a localização das PV, a fim de verificar a economia de energia dos edifícios, além de estudos que verifiquem a durabilidade, valor estético e fatores sociais.

Cortês *et al.* (2021a) apontam que o número de estudos que consideram o potencial de sequestro de carbono no sistema de PV é relativamente pequeno, sugerindo a necessidade de pesquisas neste tema. Outro fator destacado pelos autores, é a falta de dados quantitativos requeridos para desenvolver uma ACV 'berço ao túmulo', portanto, eles sugerem que estudos experimentais considerando cenários reais devam ser feitos.

Blanco *et al.* (2021) apontam que mais estudos deveriam ser realizados a fim de diminuir as incertezas provenientes das escolhas das espécies de plantas e a porcentagem de materiais reciclados inseridos como materiais construtivos. Châfer *et al.* (2021) apontam que mais pesquisas são necessárias no design dos sistemas de PV com foco na redução dos impactos ambientais gerais, e que um dos maiores problemas das PV tem sido os poucos dados a respeito dos benefícios intangíveis.

Finalmente, Perini *et al.* (2021) identificaram que a aplicação de PV permite uma redução no potencial de aquecimento global e na demanda de energia cumulativa de cerca de 29-30% ao longo da vida útil de 10 anos e 45-46% ao longo da vida útil de 25 anos. Por outro lado, os autores verificaram um aumento no consumo de água de 52% em uma base de 10 anos e 46% em 25 anos, devido ao processo de irrigação. Os autores também identificaram uma redução de 56% de potencial de aquecimento global e demanda de energia cumulativa, em relação ao cenário convencional na etapa de uso das PV. Apesar das vantagens oferecidas pelo sistema de PV, o aumento no consumo de água na fase de uso pode se tornar um fator limitante para a aplicação em grande escala, podendo se tornar inviável, dependendo da disponibilidade de água para uma determinada região.

## CONCLUSÕES

O presente estudo de revisão analisou as pesquisas de avaliação do ciclo de vida (ACV) aplicada às paredes verdes (PV). A partir da análise, verificou-se que o número de estudos com foco neste tema é ainda restrito, porém atual – dos doze estudos identificados, o primeiro foi publicado em 2011, e 50% dos demais foram publicados em 2021.

Embora a utilização de PV no meio urbano traga benefícios ambientais, mais estudos devem ser realizados a fim de analisar os impactos ambientais considerando cenários reais, auxiliar na definição dos materiais para sua manufatura, de forma e aumentar a sustentabilidade destas infraestruturas, e impulsionar a sua utilização.

A geração de impactos ambientais das PV provém principalmente da escolha dos materiais utilizados, sendo a fase de produto (extração de matéria-prima e manufatura) predominante na geração dos impactos. Assim, o uso de materiais reciclados pode ser uma alternativa sustentável para reduzir os impactos das etapas de extração de matéria-prima e de fim de vida, sendo essa uma sugestão dos autores para o desenvolvimento de trabalhos futuros sobre PV.

A multifuncionalidade das PV garante diversos benefícios ambientais, entretanto, estudos que abordem a avaliação econômica em conjunto devem ser realizados a fim de comparar a viabilidade entre PV e parede convencional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.040: gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – princípios e estrutura*. Rio de Janeiro, 2009a.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14.044: gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro, 2009b.
3. AKINWOLEMIWA, O.H., DE SOUZA, C.B., DE LUCA, L.M., GWILLIAN, J. *Building community-driven vertical greening systems for people living on less than £1 a day: A case study in Nigeria*. *Building and Environment*, v. 131, p. 277–287, 2018.
4. BARBOSA, M.C., FONTES, M.S.G.C. *Jardins Verticais: Modelos e Técnicas*. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 7, no 2, p. 114-124, 2016.
5. BOVEA, M., POWELL, J. *Developments in life cycle assessment applied to evaluate the environmental performance of construction and demolition wastes*. *Waste Management*, v. 50, p. 151-172, 2016.

6. BUSTAMI, R.A., BELUSKO, M., WARD, J., BEECHAM, S. *Vertical greenery systems: A systematic review of research trends*. Building and Environment, v. 146, p. 226-237, 2018.
7. BLANCO, I., VOX, G., SCHETTINI, E., RUSSO, G. *Assessment of the environmental loads of green façades in buildings: a comparison with un-vegetated exterior walls*. Journal of Environmental Management, v.294, p. 112927, 2021.
8. COSOLA, V.O.D., OLIVIERI, F., RUÍZ-GARCÍA, L., BACENETTI, J. *An environmental Life Cycle Assessment of Living Wall Systems*. Journal of Environmental Management, v. 254, p. 109743, 2020.
9. CORTÊS, A., TADEU, A., SANTOS, I.M., DE BRITO, J., ALMEIDA, J. *Environmental performance of a cork-based modular living wall from a life-cycle perspective*. Building and Environment, v. 191, p. 107614, 2021a.
10. CORTÊS, A., TADEU, A., SANTOS, I.M., DE BRITO, J., ALMEIDA, J. *Innovative module of expanded cork agglomerate for green vertical systems*. Building and Environment, v. 188, p. 107461, 2021b.
11. CHÁFER, M., PÉREZ, G., COMA, J., CABEZA, L.F. *A comparative life cycle assessment between green walls and green facades in the Mediterranean continental climate*. Energy & Buildings, v. 249, 111236, 2021.
12. CHAROENKIT, S., YIEMWATTANA, S. *Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review*. Building and Environment, v. 105, p. 82-94, 2016.
13. CHATZIMENTOR, A., APOSTOLOPOULOU, E., MAZARIS, A.D. *A review of green infrastructure research in Europe: Challenges and opportunities*. Landscape and Urban Planning, v. 198, p. 103775, 2020.
14. EL MENSRAWY, A.S., MOHAMED, A.F., FATHY, N.M. *A comparative study on green wall construction systems, case study: South valley campus of AASTMT*. Case Studies in Construction Materials, v. 16, p. e008808, 2022.
15. EUROPEAN COMMISSION – JOINT RESEARCH CENTER. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union, 2010.
16. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *FAO framework for the Urban Food Agenda*. Rome. 2019.
17. FENG, H., HEWAGE, K. *Life cycle assessment of living walls: air purification and energy performance*. Journal of Cleaner Production, v. 69, p. 91-99, 2014.
18. INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÕES EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Manual do Sistema de ILCD: sistema internacional de referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos*. 2015.
19. JAIN, S., SINGHAL, S., PANDEY, S. *Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban India*. Resources, Conservation & Recycling, v. 155, p. 104642, 2020.
20. JESUS, M.P.D., LOURENÇO, J.M., ARCE, R.M., MACIAS, M. *Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour*. Building and Environment, v. 119, p. 11-19, 2017.
21. KIM, J., HONG, T., JEONG, J., KOO, C., JEONG, K. *An optimization model for selecting the optimal green systems by considering the thermal comfort and energy consumption*. Applied Energy, v. 169, p. 682-695, 2016.
22. KIO, P.; ALI, A.K. *In situ experimental evaluation of a novel modular living wall system for industrial symbiosis*. Energy & Buildings, v. 252, p. 111405, 2021.
23. LAKHO, F.H., VERGOTE, J., KHAN, H.I., DEPUYDT, V., DEPREEUW, T., HULLE, S.W.H.V., ROUSSEAU, D.P.L. *Total value wall: Full scale demonstration of a green wall for grey water treatment and recycling*. Journal of Environmental Management, v. 298, 113489, 2021.
24. MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. *Green wall systems: A review of their characteristics*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 41, p. 863-871, 2015.
25. MANSO, M., CASTRO-GOMES, J., PAULO, B., BENTES, I., TEIXEIRA, C.A. *A Life cycle analysis of a new modular greening system*. Science of the Total Environment, v. 627, p. 1146-1153, 2018.
26. MANSO, M. TEOTÓNIO, I., SILVA, C.M., CRUZ, C.O. *Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110111, 2021.
27. MAYRAND, F., CLERGEAU, P. *Green Roofs and Green Walls for Biodiversity Conservation: A Contribution to Urban Connectivity?*. Sustainability, v. 10, p. 985, 2018.
28. OTTELÉ, M., PERINI, K., FRAAJ, A.L.A., HAAS, E.M., RAITERI, R. *Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems*. Energy and Buildings, v. 43, p. 3419-3429, 2011.

29. PAN, L., CHU, L. M. Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a *vertical*. *Building and Environment*, v. 96, p. 293-300, 2016.
30. PEARLMUTTER, D., PUCHER, B., CALHEIROS, C.S.C., HOFFMANN, K.A., AICHER, A., PINHO, P., STRACQUALURSI, A., KOROLOVA, A., POBRIC, A., GALVÃO, A., TOKUÇ, A., BAS, B., THEOCHARI, D., MILOSEVIC, D., GIANCOLA, E., BERTINO, G., CASTELLAR, J.A.C., FLASZYNSKA, J., ONUR, M., MATEO, M.C.G. *Closing Water Cycles in the Built Environment through Nature-Based Solutions: The Contribution of Vertical Greening Systems and Green Roofs*. *Water*, v. 13, p. 2165, 2021.
31. PERINI, K., MAGRASSI, F., GIACHETTA, A., MORESCHI, L., GALLO, M., BORGHI, A. *Environmental Sustainability of Building Retrofit through Vertical Greening Systems: A Life-Cycle Approach*. *Sustainability*, v. 13, p. 4886, 2021.
32. RILEY, B. *The state of the art of living walls: Lessons learned*. *Building and Environment*, v. 114, p. 219-232, 2017.
33. SALAH, G.M.J.A.; ROMANOVA, A. *Life cycle assessment of felt system living green wall: Cradle to grave case study*. *Environmental Challenges*, v. 3, p. 100046, 2021.
34. SEIWERT, A.; RÖBLER, S. *Understanding the term green infrastructure: origins, rationales, semantic content and purposes as well as its relevance for application in spatial planning*. *Land Use Policy*, v. 97, p. 104785, 2020.
35. SERRA, V., BIANCO, L., CANDELARI, E., GIORDANO, R., MONTACCHINI, E., TEDESCO, S., LARCHER, F., SCHIVIA, A. *A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research Project*. *Energy and Buildings*, v. 146, p. 333-352, 2017.
36. SHAFIQUE, M., AZAM, A., RAFIQ, M., ATEEQ, M., LUO, X. *An overview of life cycle assessment of green roofs*. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119471, 2020.
37. SUSCA, T., ZANGHIRELLA, F., COLASUONNO, L., FATTO, V.D. *Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, p. 112100, 2022.
38. VIECCO, M., JORQUERA, H., SHARMA, A., BUSTAMANTE, W., FERNANDO, H.J.S., VERA, S. *Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter*. *Building and Environment*, v. 204, p. 108120, 2021.
39. YSEBAERT, T., KOSH, K., SAMSON, R., DENYS, S. *Green walls for mitigating urban particulate matter pollution—A review*. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 59, p. 127014, 2021.