

Resíduos Sólidos e Sustentabilidade Urbana: Indicadores de metabolismo urbano sob tratamento dos resíduos sólidos

Maria Vitória da Silva Garcia

Mestre e Doutoranda, UNESP, Brasil.

mvs.garcia@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0001-6797-2275>

Giulliana Mondelli

Professora Doutora, UNESP, Brasil.

g.mondelli@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0001-9010-4353>

Rodrigo Braga Moruzzi

Professor Doutor, UNESP, Brasil.

rodrigo.moruzzi@unesp.br

<https://orcid.org/0000-0002-1573-3747>

Submissão: 28/04/2025

Aceite: 15/07/2025

GARCIA, Maria Vitória da Silva; MONDELLI, Giulliana; MORUZZI, Rodrigo Braga. Resíduos Sólidos e Sustentabilidade Urbana: Indicadores de metabolismo urbano sob tratamento dos resíduos sólidos. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S. I.J, v. 13, n. 88, 2025. DOI: [10.17271/23188472138820255783](https://doi.org/10.17271/23188472138820255783). Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/5783. Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Resíduos Sólidos e Sustentabilidade Urbana: Indicadores de metabolismo urbano sob tratamento dos resíduos sólidos

RESUMO

Objetivo - Este artigo tem por objetivo apresentar uma revisão crítica acerca dos estudos de metabolismo urbano com foco em resíduos sólidos urbanos (RSU) e seus métodos de tratamento disponíveis.

Metodologia - O método PRISMA foi utilizado para analisar e classificar as pesquisas relevantes.

Originalidade/relevância – Há uma integração reduzida entre metabolismo urbano e os métodos de tratamento dos resíduos; lacuna importante nos estudos relacionados a metabolismo e caracterização dos impactos dos métodos.

Resultados - Verificaram-se lacunas em estudos abrangentes e que considerem fluxos diversificados; assim como a escassez de estudos com análises de contaminantes e diversos outros aspectos que podem ser analisados e utilizados em indicadores metabólicos, tais como micro plásticos presentes em água, materiais particulados no ar, etc.

Contribuições teóricas/metodológicas - Verificou-se a existência de diversos estudos correlacionando fluxos e indicadores metabólicos no contexto dos RSU, porém poucas pesquisas relacionam os métodos de tratamento.

Contribuições sociais e ambientais - Aponta-se para perspectivas futuras de pesquisa que incorporem os aspectos pertinentes ao metabolismo urbano associado aos métodos de tratamento de resíduos sólidos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos sólidos urbanos. Metabolismo urbano. Indicadores chave de performance.

Solid Waste and Urban Sustainability: Urban metabolism indicators under solid waste treatment

ABSTRACT

Objective – This article aims to present an urban metabolism studies critical review focusing on urban solid waste (MSW) and its available treatment methods.

Methodology – To analyse and classify the relevant research the PRISMA method was used.

Originality/Relevance – There is limited integration between urban metabolism and waste treatment methods; an important gap exists in studies related to metabolism and the characterization of the impacts of these methods.

Results – Comprehensive studies with diversified flows were found, still having gaps in the diversification. Likewise, the scarcity of studies with contaminant analyses and several other aspects that can be analysed and used in metabolic indicators; such as micro plastics present in water, particulate matter in the air, etc.

Theoretical/Methodological Contributions – Several studies were found correlating metabolic flows and indicators in the context of MSW, however few studies report treatment methods.

Social and Environmental Contributions – Future perspectives research are pointed out that incorporate pertinent aspects to urban metabolism associated with treating urban solid waste methods.

KEYWORDS: Urban solid waste. Urban metabolism. Key Performance Indicators.

Residuos Sólidos y Sostenibilidad Urbana: Indicadores del metabolismo urbano bajo tratamiento de residuos sólidos

RESUMEN

Objetivo – Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión crítica de los estudios sobre el metabolismo urbano centrados en los residuos sólidos urbanos (RSU) y sus métodos de tratamiento disponibles.

Metodología – Se utilizó el método PRISMA para analizar y clasificar las investigaciones relevantes.

Originalidad/Relevancia – Existe poca integración entre el metabolismo urbano y los métodos de tratamiento de residuos; una brecha importante en los estudios con el metabolismo y la caracterización de los impactos.

Resultados – Hubo lagunas en los estudios integrales que consideran flujos diversos; así como la escasez de estudios que analicen contaminantes y otros aspectos diversos que puedan ser analizados y utilizados en indicadores metabólicos, como micro plásticos presentes en el agua, material particulado en el aire, etc.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – Se verificó la existencia de varios estudios que correlacionan flujos e indicadores metabólicos en el contexto de los RSU, pero pocas investigaciones relacionan los métodos de tratamiento.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Por lo tanto, apunta a perspectivas futuras de investigación que incorporen aspectos relevantes al metabolismo urbano asociados a los métodos de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

PALABRAS CLAVE: Residuos sólidos urbanos. Metabolismo urbano. Indicadores Clave de Desempeño.

1 INTRODUÇÃO

O contínuo aumento das populações urbanas resultou em diversos impactos no ambiente provindos de sua produção e operação, despertando assim preferências em conceitos como os de metabolismo urbano (MU). Isto serve como base para as cidades se tornarem sustentáveis e com melhor controle de sua dinâmica interna (Pincetl et al., 2014). Essa necessidade de controle de seus fluxos levou ao conceito de metabolismo urbano o qual utiliza seus processos urbanos internos para controle e criação de métricas de crescimento, produção de energia e eliminação de resíduos (Kennedy, Cuddihy e Engel-Yan, 2007).

O conceito de metabolismo urbano é aplicado para a quantificação integrada de diversos dados de entrada, saída e armazenamento de energia, materiais, água e resíduos diversos (Kennedy, Pincetl e Bunje, 2011). Esses quantitativos possibilitaram uma avaliação ampla do ambiente urbano com base em informações estruturais do sistema, substâncias presentes no ambiente e interações dinâmicas nos fluxos urbanos (Huang et al., 2012).

No entanto, apesar dos grandes avanços conexos ao conceito de metabolismo urbano, e mesmo com estudos constantes abordando aspectos metabólicos de grandes centros urbanos, como Sahely, Dudding e Kennedy, (2003), Pincetl et al., (2014), e Liu et al., (2024); ainda não são explorados completamente em termos de abrangência dos fluxos analisados. Grande parte dos estudos ainda utilizam a seleção de indicadores de forma aleatória ou focando em regiões e/ou processos limitados, de forma que não tenha uma padronização nas análises que permitem trabalhos comparativos, assim como sua aplicação prática para tomadores de decisões.

Isso acontece também devido à similaridade dos conceitos com avaliação do ciclo de vida (ACV), a qual avalia o impacto de um produto desde sua produção até se tornar resíduo (Hayatina, Auckaili e Farid, 2023); análogo também a economia circular, que se refere ao fluxo de um material no sistema, porém eliminando os conceitos de resíduos e inserindo-o novamente para sua utilização (Usman et al., 2024). Também há uma semelhança aos conceitos do nexus agua-energia em geral, que avaliam as interconexões e interdependência desse sistema promovendo uma gestão integrada dentro dos componentes do nexus, em qualquer ambiente evitando impactos negativos em seu balanço (Kumar e Saroj, 2014).

O metabolismo urbano difere-se principalmente em sua base e objetivo, considerando o sistema urbano como um sistema dinâmico e funcionamento semelhante ao corpo humano, onde este utiliza suas entradas, transforma-as em fluxos - tanto de água, energia, poluentes, resíduos em geral – para posteriormente ser quantificados em suas saídas. Esses índices são rotulados indicadores de performance do sistema, foco das análises metabólicas para levantamento de impactos e ferramenta de auxílio a uma gestão integrada, eficiente e sustentável (Kennedy, Pincetl e Bunje, 2011).

Os índices e indicadores são de grande importância, pois, fornecem diagnóstico e norteiam as políticas públicas apresentando a situação sanitária e ambientais (Alvares e Ventura, 2024). Os resíduos sólidos são um dos principais desafios enfrentados pelo poder público ultimamente, sendo necessário sua adequada gestão. Por outro lado, a aplicação da sustentabilidade no gerenciamento dos resíduos tem sido um desafio ainda maior. Assim, o metabolismo urbano vem ao encontro dessa necessidade, fornecendo suporte para a avaliação da sustentabilidade urbana (Liu et al., 2024).

Deste modo, o presente artigo aborda estudos sobre o panorama dos resíduos sólidos sob a óptica dos conceitos do metabolismo urbano, analisando quais dados de entrada devem ser considerados, bem como seus fluxos comumente analisados e seus indicadores de performance.

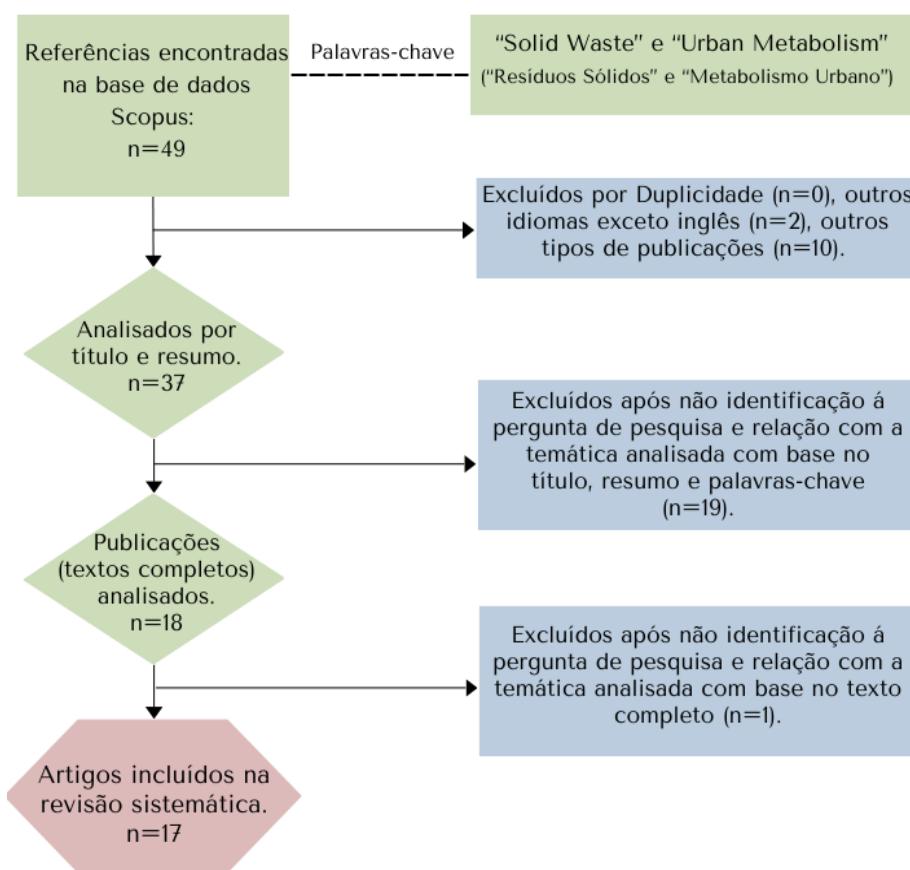
2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é incorporar o metabolismo urbano no contexto dos RSU, com ênfase aos tipos de tratamento, e como estes impactam nos indicadores aplicados.

3 METODOLOGIA

Este trabalho trata-se de uma revisão sistemática da literatura realizada com auxílio do método PRISMA, para destaque e relevância dos tipos de tratamento de resíduos sólidos nas análises de metabolismo urbano. Esta pesquisa foi feita conforme apresentado no fluxograma da Figura 1, e detalhado nas seções subsequentes.

Figura 1 - Fluxograma de definição de amostra baseado no método PRISMA (MOHER et al., 2015).



3.1. Identificação

A busca de artigos para a referida revisão integrativa de literatura foi feita a partir da busca de artigos científicos na base de dados de resumos *Scopus*. Sendo feita em título, resumo e palavras-chave com a associação: *solid waste* (resíduos sólidos) e *urban metabolism* (metabolismo urbano). Não houve limitações de data na pesquisa, a fim de que nenhum artigo alinhado ao objetivo fosse excluído da amostra.

3.2. Triagem

Os termos foram pesquisados em inglês devido a este ser a língua principal da base *Scopus* e cientificamente mais difundido. Portanto, na primeira fase da triagem foram eliminadas as publicações científicas não disponíveis na língua inglesa, assim como outros tipos de publicações como documentos de conferências e editoriais.

3.3. Critério de elegibilidade

Após a triagem e listagem dos artigos, foi feita uma segunda fase com base nos títulos e resumos, sendo selecionados aqueles os quais abrangiam os resíduos sólidos sob perspectiva de metabolismo urbano, sendo eliminados os que tratavam de outros tipos de metabolismo e também outras áreas de estudo.

3.4. Inclusão

Na última etapa, os artigos selecionados - excluindo todos os citados anteriormente - foram integralmente analisados de forma a possibilitar a realização de uma classificação e discussão direcionada ao foco da pesquisa. Ao todo foram analisados dezessete artigos científicos, cujas análises estão dispostas a seguir.

4 RESULTADOS

O estudo do metabolismo urbano permite mensurar a intensidade das interações urbanas, sua dinâmica e seus impactos (Kennedy, C.; Cuddihy; Engel-Yan, 2007), de forma que contribui para o controle dos processos urbanos, tais como como acumulação e/ou despejo de nutrientes, qualidade da água; e outros marcadores que podem ser utilizados para análise de longo prazo (Kennedy, C.A. et al., 2015).

Portanto, para se obter um domínio abrangente é importante que os resíduos sólidos também sejam explorados sob a perspectiva do metabolismo urbano; tanto nos processos, materiais, diversas dimensões de estudos, quanto nos diversos indicadores de performance; a fim que se obtenha uma boa representatividade do que ocorre no ambiente real. Assim, pode-se contribuir para a gestão dos RSU e do ambiente urbano em geral, de forma que sejam aprimorados a sustentabilidade e impactos do processo (Facchini; Mele; Caldarelli, 2021).

O resultados das 17 publicações analisadas estão apresentados na Figura 2. Os resultados foram divididos em cinco subtópicos e posteriormente discutidos, sendo eles:

Contexto de estudos de RSU e metabolismo urbano, tipos de tratamentos de resíduos sólidos e suas implicações nas análises metabólicas, indicadores metabólicos analisados em RSU.

Figura 2 - Resumo gráfico do foco desta revisão.

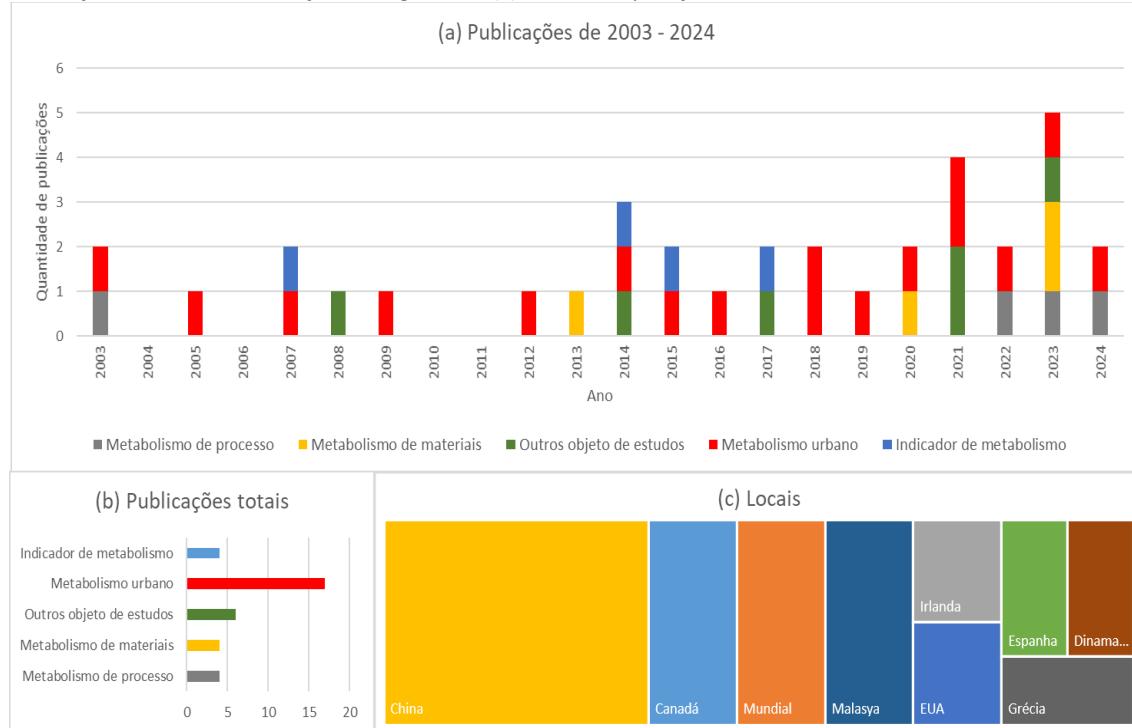


4.1. Contexto de RSU e metabolismo urbano

Na Figura 3a foram distribuídos temporalmente os artigos analisados, apresentando uma constância temporal dos estudos relacionados ao conceito geral de MU, tendo seu primeiro estudo de caso apresentado por Sahely; Dudding; Kennedy, (2003), sobre os fluxos de massa variados no ambiente urbano de Toronto, CA. A mesma figura também evidencia a recente interrupção das análises de novos indicadores.

Pode-se observar na Figura 3b que grande parte dos artigos encontrados referem-se ao conceito de metabolismo urbano, contendo apenas alguns referentes ao metabolismo de processos e materiais no ambiente urbano, outros trabalhos com foco em indicadores individuais e diferentes objetos de estudo.

Figura 3 - Perspectiva das pesquisas: (a) Publicações por ano com as relações entre RSU e metabolismo urbano; (b) Publicações totais com as relações na figura “a”; (c) Locais de aplicações analisados.



O estudo mais recente - realizado por Liu et al., (2024) – explora novas perspectivas metabólicas relacionadas a conversão dos indicadores em trabalho energético. O mesmo apresenta uma possibilidade de como o trabalho energético pode ser aplicado como um índice unificado de representatividade dos RSU, extremamente importante, com foco em criar um índice geral que permita comparações.

Grande parte dos estudos percorridos analisando RSU e MU foram analisados na Ásia, com 46% (China e Malásia), Europa com 24% (Irlanda, Espanha, Dinamarca e Grécia) e América do Norte 18% (EUA e Canadá) e espalhados mundialmente apenas 12%, conforme observado na Figura 3c; o que destaca a necessidade de novos estudos distribuídos mundialmente, a fim de se obter uma perspectiva global dos impactos metabólicos dos RSU.

4.2. Tratamento de RSU e suas implicações nas análises metabólicas

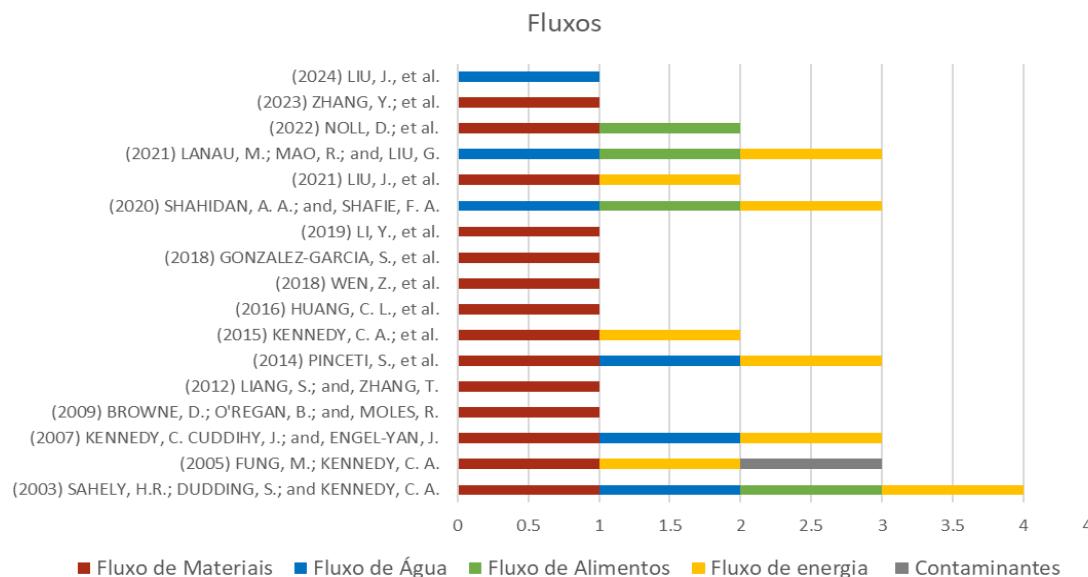
Ultimamente são utilizadas diversas formas de destinos para os RSU, podendo ser tratados em aterros sanitários Wen et al. (2018), utilizados para geração de energia “Waste-to-energy” (Liu et al., 2021), reciclados (Liang; Zhang, 2012), e também conforme outros métodos. Esses processos também impactam no metabolismo urbano, visto que podem retornar materiais e interferir nos balanços de massa, prover e/ou utilizar energia do sistema, transformar esses materiais em substâncias distintas (poluentes ou não), entre outros. Devendo, portanto, ser considerados e mensurados durante as análises metabólicas.

Apenas 18% dos trabalhos encontrados analisam os tipos de tratamento – Reciclagem (Liang; Zhang, 2012), Aterros Sanitários (Wen et al., 2018) e Processos “Waste-to-energy” (Liu

et al., 2021; Wen et al., 2018) - como atuantes no metabolismo urbano; dentre os quais analisam fluxo de materiais (Liang; Zhang, 2012; Liu et al., 2021; Wen et al., 2018) e energia (Liu et al., 2021), não considerando diversos fluxos fundamentais como fluxo de água, contaminantes ou alimentos.

Porém, observam-se limitações em algumas análises, sendo ocasionadas pelas restrições na variedade dos resíduos analisados (Liu et al., 2021) e fluxos (Liang; Zhang, 2012; Wen et al., 2018). Portanto, é de extrema importância que as variações de fluxos e métodos de tratamento sejam exploradas em novos estudos. A Figura 4 a estratificação por fluxos de materiais, água, alimentos, energia e contaminantes.

Figura 4 - Tipos de fluxos em publicações de metabolismo urbano com RSU.



Apesar de diversos autores correlacionarem metabolismo urbano com análises de fluxos de materiais (MFA – Material fluxes analysis) - conforme manifestado na

Figura 4 com a grande incidência de estudos com fluxos de materiais - a presença deste tipo de fluxo nas análises mantém-se praticamente constantes ao longo dos anos e dos estudos. Essa frequência pode ser explicada pela relação entre os conceitos de balanço de massa, fundamento do metabolismo urbano e balanço de materiais.

Os trabalhos em que são analisados os fluxos de água e energia também ocorrem em uma certa frequência de publicações, e ocasionalmente algumas pesquisas com alimentos e fluxo de contaminantes – sendo esta apenas uma encontrada (Fung; Kennedy, 2005). Vale ressaltar que não houveram pesquisas com todos os fluxos classificados simultaneamente, assim como não houveram pesquisas em resíduos sólidos com outros fluxos, como temperatura, aspectos sociais ou mesmo impactos no ecossistema.

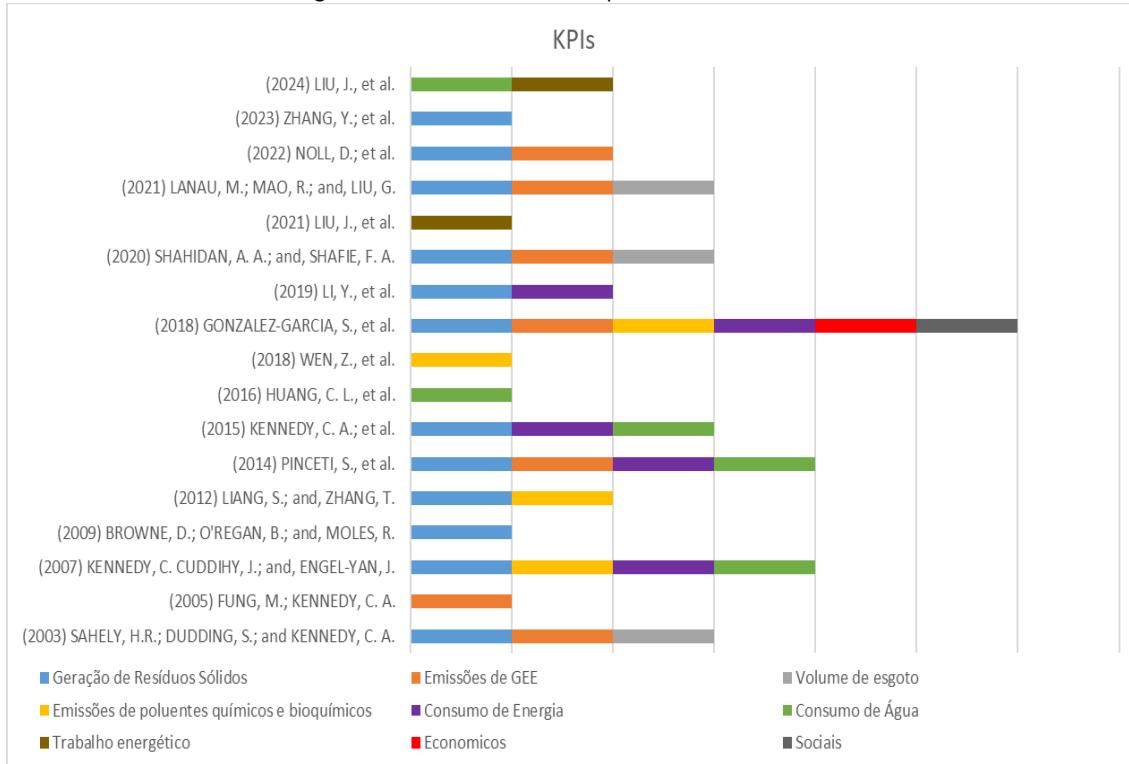
4.3. Indicadores metabólicos em RSU

Após as interpretações em fluxos analisados nas publicações, também é importante qualificar os índices avaliados para caracterização do panorama, pois estes são considerados

como indicadores chave de performance (KPIs) metabólica, representando os “outputs” dos fluxos.

O volume de geração de resíduos vem sendo amplamente utilizado como indicador ao longo do tempo - o que pode também ser observado na Figura 5 – sob a influência dos fluxos de materiais.

Figura 5 - Indicadores chave de performance analisados.



Estudos recentes (Liu et al., 2021, 2024) exploram o trabalho energético como indicador de saída que representa o metabolismo urbano, chamando de indicador sustentável de metabolismo urbano. Porém este foi apresentado apenas sob perspectiva dos métodos de gaseificação e incineração (Liu et al., 2021); ou sob seu ciclo urbano, desde sua coleta a sua destinação final (Liu et al., 2024).

Outro indicador que também vem sendo bem explorado é a emissão de gases de efeito estufa (GEE), devido à grande preocupação recente com a sustentabilidade. Este indicador é o único da lista que foi analisado sob todos os fluxos encontrados, porém não simultaneamente.

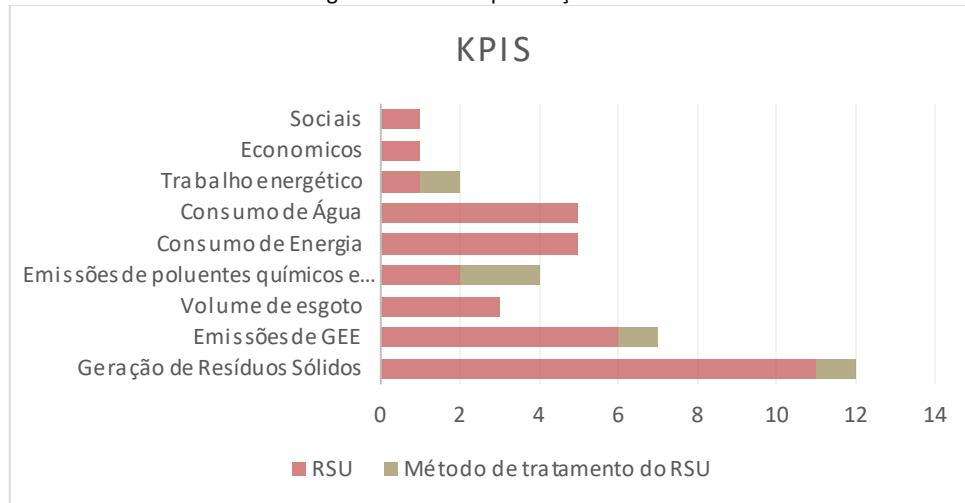
Nos indicadores pouco explorados como volume de esgoto e trabalho energético tem-se consideráveis variações de fluxos, já em indicadores alternativos como econômicos e sociais são estudos escassos.

Também é importante ressaltar que o estudo que mais possui indicadores analisados é aquele que é visto sob influência apenas do fluxo de materiais, assim como também há uma tendência de se analisar emissões de GEE e materiais quando se analisa volume de esgoto, e estes, na maioria das vezes são considerados sob os fluxos de água, energia e alimentos.

Na Figura 6 pode-se observar que grande parte das publicações analisadas focam em RSU como zona de controle para suas observações, assim como todos os indicadores de

performance analisados foram ao menos uma vez considerado para análise em generalizações do RSU em uma zona urbana.

Figura 6 - Foco de publicações e KPIS.



O mesmo não pode ser afirmado dos métodos de tratamento dos RSU, tendo sido abordados apenas os indicadores de quantidade de resíduos gerados no ambiente urbano, trabalho energético em abordagens recentes e emissão de poluentes químicos e bioquímicos - sendo estes apenas controle de nitrogênio disposto (Wen et al., 2018) e outro com diversos químicos, porém apenas na perspectiva de reciclagem (Liang; Zhang, 2012).

Todos os trabalhos que trazem a perspectiva dos métodos de tratamento dos RSU dentro do metabolismo urbano são estudos de caso em cidades chinesas, dentre os quais exploram majoritariamente o fluxo de materiais e energia.

Liang e Zhang (2012) trazem análises em que mensuram diversos impactos dos cenários de um método específico de tratamento - a reciclagem dos RSU - nos volumes de resíduos gerados após o tratamento, emissões de diversos poluentes (entre eles DQO, petróleo, amônia, metais pesados, CO₂ etc.). Por outro lado, outros trabalhos exploram diversos tipos de tratamento de RSU em indicadores específicos, como emissões de poluentes químicos (Wen et al., 2018) e trabalho energético (Liu et al., 2021).

4.4. Discussões

As publicações tiveram foco na: proposta e teste de novos indicadores individuais, metabolismo de apenas um material, processo ou produto específico; como também outras dimensões de controle.

Todos os artigos analisados dentro dos tópicos de metabolismo urbano e RSU foram classificados como estudo de caso, sendo apenas 18% destes focados nos impactos dos tipos de tratamento de resíduos sólidos, sem proposta de novos indicadores neste quesito. A indicação de novos indicadores é de extrema importância, para que os tomadores de decisões sejam capazes de fazerem sugestões acuradas e relevantes (Liu et al., 2024).

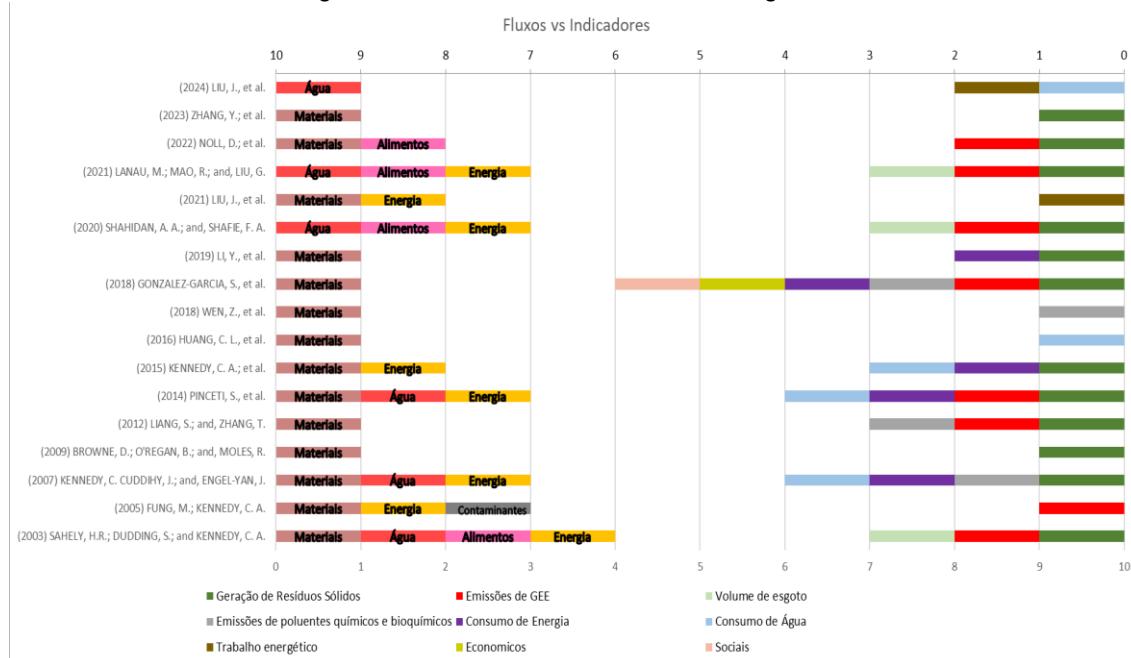
Essa relativa falta de atenção a metodologias específicas de tratamento na literatura sobre metabolismo urbano representa um descuido notável. Dado que a seleção e a implementação de tecnologias de tratamento de RSU influenciam diretamente os fluxos de materiais, o consumo de energia, os perfis de emissões e, em última análise, a sustentabilidade dos sistemas urbanos. Uma integração mais explícita dos processos de tratamento em estudos sobre metabolismo urbano é crucial para fornecer insights açãoáveis aos tomadores de decisão.

O desenvolvimento de novos indicadores-chave de desempenho (KPIs) que abordem especificamente os impactos ambientais, econômicos e sociais de vários métodos de tratamento de RSU é, portanto, essencial. Por exemplo, indicadores poderiam ser desenvolvidos para avaliar o potencial de circularidade de diferentes tecnologias de reciclagem, a eficiência energética e as emissões associadas aos processos de conversão de resíduos em energia, ou os impactos ambientais da deposição em aterros sanitários. Tais indicadores proporcionariam uma compreensão mais detalhada de como diferentes opções de tratamento contribuem ou prejudicam as metas de sustentabilidade urbana, incluindo a eficiência de recursos (conforme abordado em Liu et al., 2024) e a redução da poluição.

Na Figura 7 apresenta-se os fluxos (esquerda) e os KPIs (direita) analisados nos estudos encontrados que tratam do metabolismo no contexto do ambiente urbano, permitindo visualizar a distribuição dos KPIs nos fluxos analisados pelos diversos autores ao longo dos anos.

Estudos abrangentes também são importantes para um panorama preciso da situação metabólica urbana, visto que nos estudos realizados há sempre um balanço entre quantidade de fluxos analisados e indicadores, resultando em uma variedade de um (fluxos versus KPIs) enquanto há muitas lacunas no outro.

Figura 7 - Fluxos analisados versus indicadores gerados.



Pode-se notar também uma tendência a novos indicadores (Liu et al., 2021, 2024) e análises mais específicas (Noll et al., 2022; Zhang et al., 2023), enquanto que as avaliações mais

diversas são relativamente mais antigas (Fung; Kennedy, 2005; Kennedy, C.; Cuddihy; Engel-Yan, 2007; Sahely; Dudding; Kennedy, 2003), evidenciando a necessidade de novas análises holísticas com indicadores recentes.

Não houve estudos coincidindo:

- Geração de resíduos sólidos e contaminantes, o que pode ser importante, principalmente em locais com destino não controlado, apesar de estudos específicos como o de Rodrigues, G. S. M.; Kaiser, I. M. e Peixoto, A. S. P. (2023);
- Emissões de poluentes químicos e bioquímicos com fluxo de contaminantes, essencial, pois para uma medição correta devem ser avaliadas contaminações diretas, não apenas provindas de fluxos de materiais, água e energia;
- Emissões de GEE ao longo do fluxo de alimentos, desde sua produção ao descarte, visto que suas produções podem ter impactos no mesmo;
- Consumo de energia e fluxo de contaminantes, principalmente correlacionados a controle e remediação dos contaminantes;
- Indicadores econômicos e sociais em todos os fluxos, não somente no de materiais.

Estudos com localizações (Kennedy, C.A. et al., 2015; Kennedy, C.; Cuddihy; Engel-Yan, 2007) e intervalos de tempo (Noll et al., 2022) diversos, devem ser percorridos também para os métodos de tratamento dos RSU, de forma que panoramas e possíveis alterações e tendências possam ser observadas.

Apesar das análises realizadas considerarem apenas os indicadores chave de performances analisadas atualmente, ainda há diversos índices e aspectos que podem ser considerados para levantamento quantitativo e qualitativo que represente a perspectiva do metabolismo de uma cidade; tais como materiais particulados em suspensão no ar, contaminação de metais na água e/ou alimentos, temperatura do ambiente, microplásticos na água, ar e/ou alimentos, nível de ecossistemas naturais no ambiente urbano, dentre outros.

A incorporação das análises contidas no metabolismo urbano permite aos gestores identificar pontos críticos e promover melhorias na ineficiência e sustentabilidade. A sustentabilidade urbana apresenta-se como um tema muito complexo, necessitando uma análise sistêmica; o que evidencia a importância dessa construção de um sistema múltiplo de indicadores (Silva et al., 2024).

Além disso, a utilização desse conceito e seus dados como ferramenta de auxílio a gestão pode gerar diversas melhorias em termos de economia, utilização de recursos e impactos ambientais. Com isso, diversas políticas públicas podem ser desenvolvidas a fim de que a gestão integrada de resíduos possa ser aplicada.

Além disso, a predominância observada de estudos de caso em localizações geográficas específicas destaca a necessidade de mais pesquisas comparativas entre diversos contextos urbanos. As características metabólicas e a eficácia de diferentes métodos de tratamento podem variar significativamente dependendo de fatores locais, como composição dos resíduos, clima, condições econômicas e marcos regulatórios. Uma abrangência geográfica mais ampla em pesquisas futuras aumentaria a generalização dos resultados e apoiaria recomendações de políticas mais específicas para cada contexto.

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou analisar sistematicamente o metabolismo urbano sob a perspectiva de resíduos sólidos por meio de uma revisão integrativa de literatura. Nesta, foram avaliados e classificados 17 artigos com base nos fluxos e indicadores chave de performance metabólica.

Os estudos revelaram grandes lacunas em pesquisas amplas e integradas, com uma escassez de trabalhos focados em contaminantes e nas diversas variedades de fluxos associados. Destacando que, enquanto os estudos mais antigos eram os complexos e abrangentes, os mais recentes têm se mostrado mais específicos e restritos a poucos fluxos e indicadores.

Também foi observado que em estudos sobre os métodos de tratamento de resíduos sólidos houve apenas fluxos de materiais e energia estimados, com poucos indicadores de performance, como trabalho, emissões de poluentes químicos e bioquímicos, e geração de resíduos sólidos.

As análises consideraram apenas os fluxos de água, energia, alimentos, contaminantes e materiais - e indicadores chave de performance, tais como Geração de resíduos sólidos e volume de esgoto, emissões de GEE e contaminantes, consumo energético, trabalho e de água; e aspectos sociais e econômicos - já contemplados na literatura. Entretanto, ainda há diversos índices e aspectos que devem ser considerados para a representação do estado metabólico de uma cidade, tais como materiais particulados em suspensão no ar, contaminação de metais na água e/ou alimentos, temperatura do ambiente, microplásticos na água, ar e/ou alimentos, nível de ecossistemas naturais no ambiente urbano, dentre outros.

Além disso, sugere-se que estudos futuros priorizem a integração explícita de métodos de tratamento de RSU em análises do metabolismo urbano. Isso deve incluir o desenvolvimento e a aplicação de novos indicadores metabólicos abrangentes que capturem os impactos multifacetados desses tratamentos, considerando não apenas os fluxos de massa e energia, mas também a presença de contaminantes, como microplásticos, na água e no ar, e a interação com ecossistemas naturais no ambiente urbano. Tais pesquisas serão vitais para proporcionar uma compreensão mais holística da sustentabilidade urbana no contexto da gestão de resíduos sólidos e para subsidiar o desenvolvimento de estratégias de gestão de resíduos mais eficazes e sustentáveis para as cidades.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALVARES, M. E. G.; VENTURA, K. S. Análise da salubridade ambiental e da sustentabilidade dos municípios da Bacia Hidrográfica Baixo Pardo/Grande Katia Sakihama Ventura. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 12, n. 85, p. 1–16, 2024.

FACCHINI, A.; MELE, R.; CALDARELLI, G. The Urban Metabolism of Lima: Perspectives and Policy Indications for GHG Emission Reductions. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 2, 2021.

FUNG, M.; KENNEDY, C.A. An integrated macroeconomic model for assessing urban sustainability. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, n. 5, p. 639–656, 2005.

HAYATINA, I.; AUCKAILI, A.; FARID, M. **Review on the Life Cycle Assessment of Thermal Energy Storage Used in Building Applications**. **Energies**. [S.I.]: MDPI, 1 fev. 2023

HUANG, C. L. et al. **Using material/substance flow analysis to support sustainable development assessment: A literature review and outlook.** *Resources, Conservation and Recycling*. [S.I.]: Elsevier B.V., 2012

KENNEDY, C.A. et al. Energy and material flows of megacities. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 19, p. 5985–5990, 2015.

KENNEDY, C.; CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. The changing metabolism of cities. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 2, p. 43–59, 2007.

KENNEDY, C.; PINCETL, S.; BUNJE, P. **The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design.** *Environmental Pollution*. [S.I.: s.n.], ago. 2011

KUMAR, P.; SAROJ, D. P. Water-energy-pollution nexus for growing cities. **Urban Climate**, v. 10, n. P5, p. 846–853, 2014.

LIANG, S.; ZHANG, T. Comparing urban solid waste recycling from the viewpoint of urban metabolism based on physical input-output model: A case of Suzhou in China. **Waste Management**, v. 32, n. 1, p. 220–225, 2012.

LIU, J. et al. Designing a sustainable municipal solid waste management system over multiple periods using extended exergy accounting method – a case study of Shanghai. **Energy and Environment**, 2024.

LIU, J. et al. Evaluating the urban metabolism sustainability of municipal solid waste management system: An extended exergy accounting and indexing perspective. **Applied Energy**, v. 300, 2021.

MOHER, David. et al. **Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement.** [S.I.: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.crd.york.ac.uk/prospero>>.

NOLL, D. et al. The sociometabolic transition of a small Greek island: Assessing stock dynamics, resource flows, and material circularity from 1929 to 2019. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 577–591, 2022.

PINCETL, S. et al. Enabling Future Sustainability Transitions: An Urban Metabolism Approach to Los Angeles Pincetl et al. Enabling Future Sustainability Transitions. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 6, p. 871–882, 2014.

RODRIGUES, G. S. M.; KAISER, I. M.; PEIXOTO, A. S. P. Gerenciamento de Cidades. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 11, n. 82, p. 2023, 2023.

SAHELY, H.R.; DUDDING, S.; KENNEDY, C.A. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 30, n. 2, p. 468–483, 2003.

SILVA, L. F. C. DA et al. Sistema de Indicadores de Sustentabilidade Urbana para Pequenas Cidades: proposição e aplicação no município do Conde/PB. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 12, n. 87, 26 dez. 2024.

USMAN, M. et al. Contribution of energy based circularity for better environmental quality: an evidence from Bias-corrected linear dynamic approach. **Discover Sustainability**, v. 5, p. 83, 2024.

WEN, Z. et al. Environmental impact analysis of nitrogen cross-media metabolism: A case study of municipal solid waste treatment system in China. **Science of the Total Environment**, v. 618, p. 810–818, 2018.

ZHANG, Y. et al. Material flow analysis and characteristics of multiple-source organic solid wastes from a perspective of ecological network analysis: A case study in Hefei, China. **Waste Management and Research**, v. 41, n. 5, p. 987–996, 2023.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Maria Vitória da Silva Garcia e Giulliana Mondelli.
 - **Curadoria de Dados:** Maria Vitória da Silva Garcia.
 - **Análise Formal:** Maria Vitória da Silva Garcia, Giulliana Mondelli e Rodrigo Braga Moruzzi.
 - **Aquisição de Financiamento:** Maria Vitória da Silva Garcia e Rodrigo Braga Moruzzi.
 - **Investigação:** Maria Vitória da Silva Garcia.
 - **Metodologia:** Maria Vitória da Silva Garcia.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Maria Vitória da Silva Garcia.
 - **Redação - Revisão Crítica:** Giulliana Mondelli e Rodrigo Braga Moruzzi.
 - **Revisão e Edição Final:** Maria Vitória da Silva Garcia, Giulliana Mondelli e Rodrigo Braga Moruzzi.
 - **Supervisão:** Giulliana Mondelli e Rodrigo Braga Moruzzi.
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Maria Vitória da Silva Garcia, Giulliana Mondelli e Rodrigo Braga Moruzzi**, declaramos que o manuscrito intitulado "**Resíduos Sólidos e Sustentabilidade Urbana: Indicadores de metabolismo urbano sob tratamento dos resíduos sólidos**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. "Este trabalho foi financiado por Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Código de Financiamento 001".
 2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-