





Avaliação emergética para a despolição do córrego Charles de Gaulle no Brasil

Emergy assessment for depollution of the Charles de Gaulle stream in Brazil

 Fabio R. Flausino¹  André Felipe Henriques Librantz²  Geraldo Cardoso de
Oliveira Neto³ and  Rafael A. Faioli⁴

¹ Doutor - Universidade Nove de Julho (UNINOVE) – São Paulo, SP- Brasil  fabiorflausino@gmail.com

² Doutor em Tecnologia Nuclear em Materiais - Universidade de São Paulo (USP). Universidade Nove de Julho (UNINOVE)
– São Paulo, SP- Brasil  librantzandre@gmail.com

³ Bolsista Produtividade em Pesquisa (PQ) nível 2, Pós-doutorado pela Universidade de Aveiro - Portugal em Gestão e
Engenharia Industrial. Universidade Federal do ABC (UFABC) / Santo André, SP  geraldo.prod@gmail.com

⁴ Gestor de Projetos focados em automação de sistemas e TI, além de Mestrando em Engenharia de Produção pela
Universidade Federal do ABC (UFABC) na Linha de Pesquisa Manufatura Avançada e Gerência de Produção.

Universidade Federal do ABC (UFABC) / Santo André, SP  rafaelfaioli00@gmail.com

Notas dos autores

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

A correspondência sobre este artigo deve ser enviada para André Felipe Henriques Librantz.

Cite as - American Psychological Association (APA)

Flausino, F. R., Librantz, A. F. H., Oliveira Neto, G. C., & Faioli, R. A. (2024). Emergy assessment for depollution of the Charles de Gaulle stream in Brazil. *Revista de Gestão Ambiental e Sociedade - GeAS*, 13(1), 1-42, e27555.

<https://doi.org/10.5585/2024.27555>





Resumo

Objetivo: Este estudo teve como objetivo realizar uma avaliação de emergia para a despoluição do riacho Charles de Gaulle no Brasil.

Metodologia: Foi adotada uma abordagem de estudo de caso, utilizando entrevistas e observação participante para a coleta de dados. A avaliação de emergia foi aplicada aos dados coletados, gerando resultados significativos.

Originalidade: Este estudo aborda uma lacuna crítica na pesquisa, uma vez que nenhuma literatura aplica especificamente a avaliação de emergia à despoluição de riachos urbanos. Ele fornece uma avaliação abrangente da revitalização do riacho e do monitoramento dos impactos, contribuindo para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6) das Nações Unidas, relacionado a água limpa e saneamento.

Resultados: Indicadores de emergia, analisados por meio de análise de sensibilidade, revelam melhorias nos serviços ecossistêmicos, na otimização de recursos e na qualidade da água. A redução na emergia total do riacho indica uma clara restauração ambiental e reintegração da sociedade ao ecossistema.

Contribuições: Esta pesquisa demonstra a viabilidade da aplicação da avaliação de emergia em processos de revitalização de água urbana. A redução na emergia total sinaliza a restauração ambiental e apoia ações práticas para alcançar o ODS 6, focado em água limpa e saneamento.

Palavras-chave: emergia, serviços ecossistêmicos, rios urbanos, análise de sensibilidade.

Emergy assessment for depollution of the Charles de Gaulle stream in Brazil

Abstract

Objective: This study aimed to conduct an emergy assessment for the depollution of the Charles de Gaulle stream in Brazil.

Methodology: A case study approach was employed, utilizing interviews and participant observation for data collection. The emergy assessment was applied to the gathered data, yielding significant results.

Originality: This study addresses a critical research gap, as no literature specifically applies emergy assessment to urban stream depollution. It provides a comprehensive evaluation of the stream's revitalization and monitoring impacts, contributing to the United Nations Sustainable Development Goal 6 (SDG 6) on clean water and sanitation.

Results: Emergy indicators, analyzed through sensitivity analysis, reveal improvements in ecosystem services, resource optimization, and water quality. A decrease in the stream's total emergy indicates clear environmental restoration and societal reintegration into the ecosystem.

Contributions: This research demonstrates the feasibility of applying emergy assessment in urban water revitalization. The reduction in total emergy signifies environmental restoration and supports practical actions toward achieving SDG 6 focused on clean water and sanitation.





Keywords: emergy, ecosystem services, urban rivers, sensitivity analysis.

Evaluación emergética para la descontaminación del arroyo Charles de Gaulle en Brasil

Resumen

Objetivo: Este estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación de emergía para la despolución del arroyo Charles de Gaulle en Brasil.

Metodología: Se utilizó un enfoque de estudio de caso, aplicando la evaluación de emergía al arroyo Charles de Gaulle. La recolección de datos involucró entrevistas y observación participante. La evaluación de emergía se aplicó a los datos recopilados, generando resultados significativos.

Originalidad: No hay estudios en la literatura que hayan aplicado específicamente la evaluación de emergía a la despolución de arroyos urbanos, revelando una brecha crítica en la investigación. Este estudio ofrece una evaluación integral para la revitalización del arroyo y el monitoreo continuo de los impactos observados en la despolución, contribuyendo al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) de las Naciones Unidas, relacionado con agua limpia y saneamiento.

Resultados: Los indicadores de emergía, calculados y analizados a través de análisis de sensibilidad, muestran mejoras en los servicios ecosistémicos, optimización de recursos y calidad del agua. A medida que la emergía total del arroyo (transformidad) disminuye, hay evidencia clara de restauración ambiental, junto con la reintegración de la sociedad en el ecosistema.

Contribuciones: Esta investigación ilustra la viabilidad de aplicar la evaluación de emergía en procesos de revitalización del agua urbana. Además, la reducción en la emergía total del arroyo indica restauración ambiental y promueve la reintegración social en el ecosistema revitalizado. También contribuye a acciones prácticas para lograr el ODS 6, enfocado en agua limpia y saneamiento.

Palabras-clave: emergia, servicios ecosistémicos, ríos urbanos, análisis de sensibilidad.

Introdução

A ausência contínua de planejamento urbano resulta em um declínio de serviços ecossistêmicos essenciais em áreas urbanas, destacando o impacto dos processos de revitalização em ambientes locais (Anin e Banahene, 2021). Um desafio significativo no tratamento da despoluição de rios urbanos é identificar e avaliar fatores que influenciam os recursos hídricos por meio de indicadores de sustentabilidade, o que é vital para partes interessadas como cidadãos, formuladores de políticas e pesquisadores (Nahiduzzaman e Sadiq, 2023).



A abordagem emergética tem sido amplamente utilizada em pesquisas quantitativas para analisar interações de sistemas sociais e ambientais. Ela avalia sistemas hidrológicos urbanos complexos integrando indicadores econômicos, técnicos e sociais, capturando as contribuições de recursos naturais e humanos em esforços de restauração (Brown e Ulgiati, 2002).

Odum (1996) define energia como "a energia disponível usada anteriormente, direta ou indiretamente, para produzir um produto ou serviço". A teoria emergética consolida vários fatores contribuintes em uma unidade comum, joules equivalentes solares (sej), permitindo uma avaliação holística de sistemas complexos. Essa medição padronizada facilita a comparação de diferentes entradas de energia, fornecendo uma estrutura abrangente para avaliar as interações do sistema (Liu et al., 2019; Song et al., 2019).

De acordo com a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005), uma revisão sistemática identificou cinco artigos-chave sobre o impacto das mudanças climáticas e ambientais, destacando a necessidade de compensação ecológica para melhorar a prestação de serviços ecossistêmicos (Li et al., 2021).

Os estudos enfatizam fatores como a relação entre a densificação urbana e a dinâmica econômica local (Song et al., 2021), o valor econômico decrescente da conservação do solo (Wang et al., 2021) e os benefícios econômicos da revitalização ambiental (Liu et al., 2019). Além disso, as crescentes pressões de desenvolvimento econômico estão associadas a maiores fluxos de energia (Zeng et al., 2010).

A energia tem sido usada em estudos de revitalização ambiental. Sun et al. (2021) analisaram a energia para melhorar zonas ecológicas restauradas, enquanto Song et al. (2019) exploraram o impacto da energia renovável na sustentabilidade ecológica. Sun et al. (2019) enfatizaram a necessidade de preservar os recursos naturais, e Zhan et al. (2018) examinaram os efeitos da industrialização nos serviços ecossistêmicos.

A avaliação da energia é destacada em três artigos que analisam os custos e o valor dos recursos hídricos, com foco nos impactos das bacias hidrográficas. Chen et al. (2009) observou sua promoção do uso eficiente da água e da estabilidade ecológica, Di et al. (2019) enfatizou o equilíbrio ecológico, e Lv et al. (2018) demonstrou sua eficácia em revelar os benefícios dos recursos hídricos.





Dois artigos principais abordam os desafios da revitalização e preservação do ecossistema em bacias hidrográficas urbanas, enfatizando ações sociais para a sustentabilidade. Su et al. (2013) destacaram a necessidade de controle populacional, descarte de resíduos e reciclagem. Pan et al. (2020) usaram análise emergética na bacia do rio Simon, na China, para mostrar como os serviços ecossistêmicos beneficiam as comunidades locais.

Além disso, Zhang et al. (2017) aplicaram análise emergética para avaliar a saúde do corpo d'água e sugerir ações de restauração, enquanto Pulselli et al. (2011) mostraram que os investimentos em infraestrutura são afetados por perdas de água, influenciando os valores emergéticos. Lv et al. (2020) enfatizaram a necessidade de incluir custos de terras urbanas no planejamento para aumentar a sustentabilidade.

A análise emergética também avalia as condições ambientais e o desempenho econômico na restauração de bacias hidrográficas, com Wu et al. (2019) demonstrando sua eficácia em destacar os benefícios ambientais da água não poluída. Os cálculos emergéticos de serviços ecossistêmicos informaram políticas públicas locais para conservação de rios (Zhong et al., 2018). No entanto, nenhum estudo aplicou especificamente a avaliação emergética à despoluição de córregos urbanos, indicando uma lacuna significativa na pesquisa. Para abordar isso, o procedimento de avaliação desenvolvido por Flausino et al. (2023) foi implementado para avaliar contribuições e melhorias na despoluição de rios urbanos, com foco em ganhos econômicos e melhorias nos serviços ecossistêmicos.

Neste contexto, a seguinte questão de pesquisa é identificada: “É viável aplicar o procedimento de avaliação de emergia em um córrego urbano?” Assim sendo, o objetivo deste estudo é conduzir uma avaliação de emergia para a despoluição do córrego Charles de Gaulle no Brasil, contribuindo para avaliações econômicas e ambientais.

A motivação teórica por trás desta pesquisa é ilustrar a viabilidade da aplicação de procedimentos de avaliação de emergia em processos de revitalização de águas urbanas. Além disso, este estudo visa demonstrar que a teoria de emergia facilita a adoção de novos indicadores de sustentabilidade.

A aplicação de indicadores de emergia na revitalização de córregos urbanos contribui significativamente para o desenvolvimento de políticas públicas mais



sustentáveis, apresentando um novo método de mensuração de vários aspectos envolvidos em um processo de descontaminação, auxiliando os tomadores de decisão a identificar e afirmar as ações práticas a serem tomadas, como determinar a alocação de investimentos econômicos, ao mesmo tempo em que aumenta a conscientização e a compreensão da população sobre os serviços ecossistêmicos fornecidos pela bacia hidrográfica. Ao integrar indicadores de emergia, os formuladores de políticas podem avaliar efetivamente os benefícios ecológicos e econômicos dos esforços de restauração, promovendo um relacionamento mais sustentável entre as comunidades urbanas e seus ambientes circundantes.

Materiais e métodos

Esta seção descreve o procedimento de avaliação de emergia para despoluição de córregos urbanos, desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura. Em seguida, detalharemos a metodologia empregada no estudo de caso do córrego Charles de Gaulle no Brasil.

Uma revisão sistemática foi conduzida usando os bancos de dados Scopus, Science Direct, Google Scholar, Springer, Emerald e Taylor & Francis, com os seguintes grupos de palavras-chave: (i) "emergia" e "serviços ecossistêmicos"; (ii) "emergia" e "indicadores de sustentabilidade"; (iii) "emergia" e "revitalização de rios urbanos"; (iv) "emergia" e "restauração de bacias hidrográficas"; (v) "emergia" e "rios urbanos". A análise de conteúdo identificou 40 artigos relevantes, dos quais apenas 19 abordaram especificamente a avaliação de emergia na revitalização de bacias hidrográficas, pântanos ou questões relacionadas à água (consulte o Apêndice A). Os 21 artigos restantes se concentraram em tópicos não diretamente relacionados à água. Os artigos foram categorizados em oito grupos com base em suas aplicações emergéticas, com o conceito de serviços ecossistêmicos enfatizando a dependência e a integração dos humanos com o meio ambiente e os serviços que ele fornece (ver Apêndice A).



Procedimento para a aplicação da avaliação emergética na despoluição de rios urbanos

A avaliação emergética começa com um diagrama sistêmico ilustrando entradas de energia relevantes que influenciam o sistema. Esse diagrama é uma ferramenta fundamental para entender como essas energias interagem e impactam os indicadores calculados (veja a Figura 1).

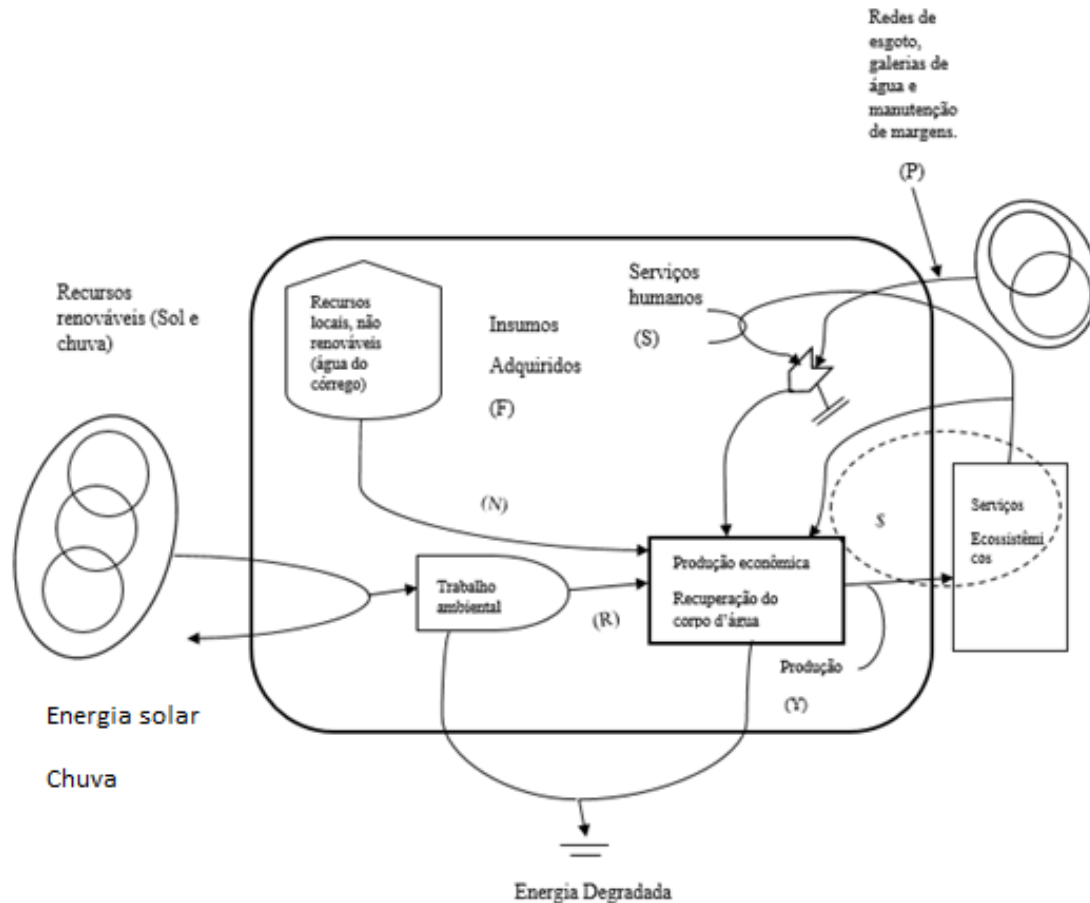
Os cálculos de energia são realizados multiplicando as transformidades por suas respectivas energias específicas. A transformidade classifica os recursos globais usados para produzir uma unidade de um serviço específico. Os recursos são categorizados em três tipos: recursos não renováveis (N), recursos econômicos (F) e recursos renováveis (R). Os recursos não renováveis (N) são aqueles consumidos mais rápido do que se regeneram, enquanto os recursos econômicos (F) são gerados por meio de atividades antropogênicas dependentes de entradas não renováveis (Odum, 1996). Essa classificação é fundamental para avaliar com precisão as contribuições emergéticas de vários tipos de recursos.

As etapas do procedimento, adaptadas de Flausino et al. (2023), são ilustradas na Figura 2 e baseadas em estudos emergéticos em bacias hidrográficas. Os valores de energia e transformidades usados neste estudo foram identificados com base em suas contribuições para o sistema fluvial (Odum, 1996), garantindo uma compreensão abrangente da dinâmica da energia.

Insumos e trabalhos relevantes incorporados ao processo de despoluição do rio são integrados às equações juntamente com dados de qualidade da água (Di et al., 2019). Os indicadores gerados permitem a análise do processo antes e depois da revitalização, fornecendo às partes interessadas as informações necessárias para implementar políticas de desenvolvimento sustentável de forma eficaz. (Sun et al., 2019). Essa abordagem não apenas avalia os resultados dos esforços de revitalização, mas também informa futuras tomadas de decisão para melhor gestão do ecossistema.).

Figura 1

Diagrama sistêmico do fluxo de energia na despoluição do córrego Charles de Gaulle.
(Adaptado de Flausino, et.al., 2023)



Os parâmetros na Figura 2 descrevem os cálculos de energia conduzidos neste estudo. A incorporação de elementos naturais, como energia solar e precipitação, está diretamente ligada à avaliação de energia. Especificamente, a energia solar é imprescindível para a transformação de componentes dentro de um sistema de energia e é um fator-chave que influencia o funcionamento de uma bacia hidrográfica. Esses insumos naturais desempenham um papel crucial na dinâmica ecológica e na saúde geral do ecossistema fluvial.

Os valores de energia identificados antes e depois do processo de despoluição — comparando água do rio com esgoto com água do rio sem esgoto — ajudam a delinear as configurações de recursos não renováveis. Esta avaliação incorpora elementos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que é utilizada para avaliar a qualidade da água do rio. Neste estudo, a verificação das medições de DBO é importante para determinar



com precisão os indicadores de emergia calculados (Flausino & Gallardo, 2021). Esta análise fornece ideias sobre a eficácia dos esforços de despoluição e seu impacto na qualidade da água.

Os recursos naturais adotados no modelo apresentado determinam parâmetros fundamentais incorporados no cálculo de transformidades e emergia em um processo de descontaminação de um rio urbano (Tabelas 01 e 02). Energia solar, índice pluviométrico e qualidade da água (DBO) fazem parte da contribuição natural na avaliação de emergia para o desenvolvimento econômico e social humano (LV, et al., 2018).

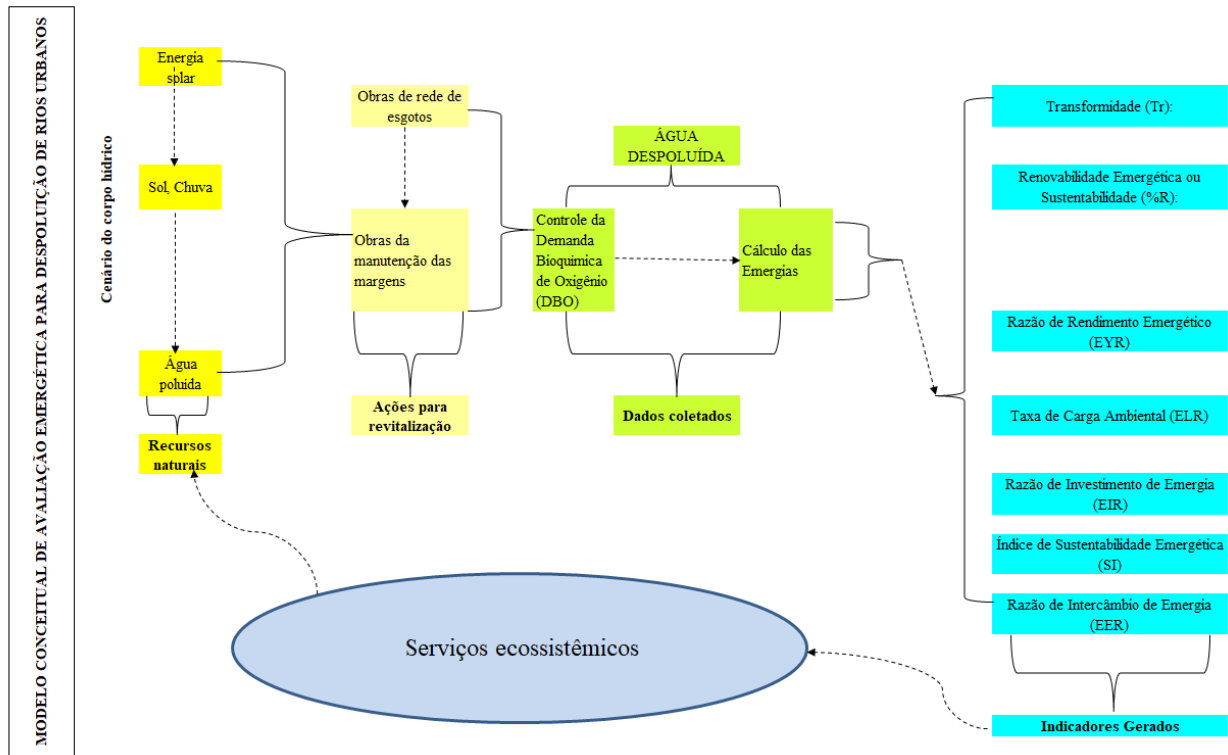
ZENG, et al. (2010) demonstraram as contribuições dos recursos naturais no contexto de bacias hidrográficas por meio da avaliação de emergia, como vazão do rio e qualidade da água diretamente relacionadas à saúde do ecossistema, essenciais para a preservação e provisão de serviços ecossistêmicos (provisão, regulação, suporte e culturais) que são cruciais para a sustentação da vida.

As avaliações de emergia conduzidas na Bacia do Rio Amarelo na China demonstraram que o volume e a qualidade do corpo d'água (DBO) após a remoção de sedimentos afetam diretamente os indicadores de emergia e transformidade usados para medir os recursos eco econômicos utilizados na região da Bacia do Rio Amarelo na China (DI, et al., 2019).

Os custos associados às redes de esgoto e à manutenção das margens dos córregos identificados neste estudo representam as despesas incorridas para os esforços de despoluição. Como os cálculos de emergia são conduzidos na análise de sistemas complexos, a incorporação desses custos relacionados à infraestrutura e à manutenção é indispensável para o desenvolvimento da estrutura analítica apresentada neste artigo. Essa abordagem abrangente garante que todos os insumos financeiros relevantes sejam considerados, aumentando a robustez da avaliação de emergia e suas implicações para práticas de gestão sustentável (Flausino, et.al., 2023).

Figura 2

Procedimento para avaliação de emergia em rios urbanos. (Adaptado de Flausino, et.al., 2023)



Os parâmetros ilustrados na Figura 2, que constituem a avaliação de emergia proposta neste estudo, focam nos principais aspectos que influenciam a despoluição de um rio urbano. A incorporação de elementos naturais, como energia solar e chuva, está diretamente alinhada com os princípios da teoria de emergia. Especificamente, a energia solar é inevitável para transformar componentes do sistema em emergia, enquanto a chuva serve como um elemento crítico dentro de uma bacia hidrográfica. Juntos, esses fatores desempenham um papel significativo na formação da dinâmica ecológica e da saúde geral do sistema fluvial.

As emergias identificadas antes e depois do processo de revitalização — comparando água do rio carregada de esgoto com água limpa do rio — são cruciais para estabelecer parâmetros de recursos não renováveis. Esta avaliação inclui elementos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), vitais para medir a qualidade da água. Verificar

as medições de DBO é essencial para calcular com precisão os indicadores de emergia e avaliar a eficácia dos esforços de revitalização.

Além disso, incluir custos associados a redes de esgoto e manutenção de margens de córregos é necessário para capturar despesas envolvidas na revitalização do corpo d'água. Ao incorporar esses custos, a avaliação emergética fornece uma análise abrangente que visa melhorar a sustentabilidade e a compreensão das implicações econômicas dos esforços de revitalização dos rios.

Equações para cálculo de indicadores emergéticos na depoluição de cursos d'água

A etapa de identificação de recursos naturais do procedimento (Figura 2) inclui equações que convertem energias naturais em emergia, permitindo a medição da taxa de contribuição da água para a emergia, bem como as contribuições econômicas derivadas dos recursos naturais incorporados no sistema hídrico. As equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 foram adaptadas de estudos de avaliação de emergia conduzidos em ambientes hidrológicos por Lv et al. (2018), Chen et al. (2009) e Pulselli et al. (2011). Elas formam a base para quantificar as várias entradas e seus impactos na avaliação geral da emergia.

$$Se = rad * S * (1 - alb) \quad (1)$$

Onde: Se é energia solar (Joules/ano); rad é radiação (Megajoules/metros quadrados/dia); alb é albedo.

$$Re = P * G * S \quad (2)$$

Onde: Re é a emergia da chuva (Joules/ano); P é a precipitação (milímetro/ano); G é a energia livre de Gibbs (Joules/grama); S é a área total da bacia hidrográfica (metros quadrados).

$$E_{pw} = BOD_p * q * E_{om} \quad (3)$$

Onde: E_{pw} é a emergia da água poluída (Joules/ano); BOD_p é a demanda bioquímica de oxigênio no fluxo poluído (miligrama/litro); q é a vazão máxima (litros/segundo); E_{om} é o material orgânico emergético (Joules/quilocal).



Os parâmetros para recursos econômicos (F) e serviços (S) nas ações de revitalização (Figura 2) incluem custos relacionados à manutenção e implementação de sistemas de esgoto no entorno do córrego estudado. A conversão dessas energias em emergia foi baseada em análises de projetos de revitalização de corpos hídricos, conforme observado nos estudos de Pulselli et al. (2011) e Lv et al. (2018). As equações relevantes para esses cálculos são as seguintes:

$$F1 = Ti / Slf \quad (4)$$

Onde: F1 é energia proveniente de ações tomadas unidade monetária definida em dólar (U\$/ano); Ti é investimento total (U\$); Slf é vida útil das redes de esgoto (anos).

$$F2 = oc * pop \quad (5)$$

Onde: F2 é energia de ações operacionais, unidade monetária definida em dólar (U\$/ano); oc é custo operacional (U\$/população/ano); pop é o total da população da área do córrego.

A emergia total (Y) usada nas equações de avaliação para melhorar o processo de despoluição de córregos e rios urbanos inclui a soma de recursos naturais renováveis e não renováveis, juntamente com a emergia do rio calculada antes e depois da revitalização. Os dados das análises de qualidade da água são integrados na Equação 6 para facilitar a etapa de coleta de dados (veja a Figura 2). Esses dados são então convertidos em emergia para avaliar a eficácia do processo de revitalização, conforme ilustrado em estudos de Sun et al. (2019) e Di et al. (2019).

$$E_{cw} = BODc * q * E_{om} \quad (6)$$

Onde: E_{cw} é Energia de água limpa (Joules/ano); BODc é Demanda bioquímica de oxigênio em fluxo limpo; q é a vazão máxima (litros/segundo); E_{om} é material orgânico emergético (Joules/quilolocal).

Os valores calculados das equações 1 a 6 são usados para determinar os indicadores emergéticos na aplicação da avaliação emergética na despoluição de rios urbanos.

As equações 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 calculam os indicadores emergéticos

desenvolvidos por Odum (1996) e são desenvolvidos em estudos que usam a avaliação emergética como método.

A transformidade (Tr) avalia a qualidade do fluxo de energia e permite fazer comparações com outras formas de energia e com outros sistemas, a transformidade solar é a razão entre a energia incorporada pelo sistema (Y) e a energia do recurso produzido (Odum, 1996 e Li, et.al. 2021).

$$Tr = Y/E_p \quad (7)$$

Onde: Tr é transformidade (Sej/J); Y é energia do recurso produzido (Sej/ano); E_p é energia do recurso produzido (Joule/ano).

A porcentagem de Renewability é a razão da energia de recursos renováveis para a energia total usada e identifica que sistemas com classificações de sustentabilidade mais altas têm uma chance maior de sobrevivência (Odum, 1996).

$$\%R = R/Y \quad (8)$$

Onde: $\%R$ é renewability (% porcentagem); R são recursos naturais (sej/ano); Y é energia do recurso produzido (sej/ano).

A Razão de Rendimento Energético (EYR) indica o rendimento emergético do sistema, ou o ganho em energia primária disponibilizada à economia que consumirá o produto. Se seu valor for próximo de um, o sistema consome tanta energia quanto disponibiliza à economia. É a razão entre a energia incorporada no produto e a energia dos insumos que vêm da economia (Odum, 1996 e Lv, et.al. 2018).

$$EYR = Y/F \quad (9)$$

Onde: EYR é a razão de rendimento emergético; Y é a energia do recurso produzido (Sej/ano); F é a soma da energia das ações tomadas (F_1) e da energia das ações operacionais (F_2).

A razão de carga ambiental (ELR) é a razão entre recursos não renováveis e renováveis. É um índice importante porque avalia a pressão que o sistema de produção causa no ecossistema. Altos índices de ELR indicam maior pressão do sistema econômico sobre o ecossistema (Li, et.al. 2021).



$$ELR = (N+F)/R \quad (10)$$

Onde: ELR é taxa de encargo ambiental; N são recursos naturais; F é soma de energia de ações tomadas (F1) e energia de ações operacionais (F2).

A taxa de investimento emergia (EIR), avalia se um dos recursos da economia (investimento monetário) em um projeto tem um bom impacto natural contrapartida de recursos e mede a proporção de emergia reciclada do setor econômico em relação às entradas de emergia do ambiente. Essa proporção indica o grau de economia ao usar os investimentos da economia em comparação com outra alternativa. Para ser econômico, o processo deve ter um valor de taxa de investimento emergia como o valor médio das atividades na região. Se exigir mais da economia do que outras alternativas, terá menos chance de sobrevivência. Caso contrário, seus custos serão menores, o que oferece uma chance de competir (Sun, et.al. 2019 e Di, et.al. 2019).

$$EIR=F/(N+R) \quad (11)$$

Onde: EIR é a taxa de investimento de energia; F é a soma de energia de ações tomadas (F1) e energia de ações operacionais (F2); N são recursos naturais; R são recursos naturais.

O índice de sustentabilidade emergética (SI) é a divisão entre a taxa de eficiência emergética e a taxa de carga ambiental e indica se o sistema contribui com energia às custas do equilíbrio ambiental ou se os impactos podem ser absorvidos pelo sistema (Zhang, et.al. 2017 e Li, et.al. 2021).

$$SI = EYR/ELR \quad (12)$$

Onde: SI é sustentabilidade emergética; EYR é razão de rendimento emergético; ELR é taxa de encargo ambiental.

A razão de troca emergética (EER) é a razão de emergia recebida para emergia fornecida em uma troca. Produtos do trabalho da natureza provavelmente têm um valor EER maior do que produtos do trabalho humano (Zhang, et.al.2017).

$$EER = Y / [produção unitária \times preço \times (emergia/dólar)] \quad (13)$$

Onde: EER é a taxa de troca de emergia.



As equações 14 e 15 foram adaptadas do trabalho de Pan, et.al. (2020), de acordo com a aplicação da teoria emergética para permitir a avaliação de serviços ecossistêmicos incorporados em processos de revitalização urbana.

Os serviços ecossistêmicos avaliados na despoluição do córrego Charles de Gaulle, usados neste trabalho, incluem cálculos para regular serviços ecossistêmicos (Equação 14) e dar suporte a serviços ecossistêmicos (Equação 15). Essas equações são derivadas do estudo de Chen et al. (2009), que as utilizou para a avaliação emergética de recursos hídricos na China. No entanto, elas não foram aplicadas anteriormente em processos de despoluição de rios urbanos.

$$Res = S * BODc * Tr \quad (14)$$

Onde: Res é a regulação dos serviços ecossistêmicos; DBOc é a demanda bioquímica de oxigênio em um fluxo limpo; Tr é a transformidade.

$$Ses = P * \rho * G * Tr \quad (15)$$

Onde: Ses está apoiando os serviços ecossistêmicos; P é a precipitação da chuva; ρ é a densidade da água; G é a energia livre de Gibbs; Tr é a transformidade.

Aplicação do procedimento de avaliação emergética para a despoluição do córrego Charles de Gaule no Brasil - Estudo de caso

Este estudo de caso descreve os resultados da pesquisa com base em dados oficiais de autoridades relevantes sobre a revitalização do córrego Charles de Gaulle. Ele demonstra a conexão entre os dados coletados e a abordagem de avaliação emergética, destacando suas contribuições para a sustentabilidade e tomada de decisões sobre o rio urbano.

A coleta de dados e a análise de campo aprimoram a aplicação das equações emergéticas de Odum (1996), apoiando a replicabilidade das avaliações em cenários de despoluição semelhantes para rios ou córregos urbanos com dados de DBO. Esta abordagem sistemática fornece uma estrutura para avaliar e melhorar a sustentabilidade de cursos d'água urbanos em vários contextos.



Procedimento de coleta de dados

A coleta de dados foi conduzida usando sites oficiais da empresa de saneamento de São Paulo, do governo municipal e do instituto meteorológico brasileiro. Esses recursos de acesso público permitem o monitoramento dos fundos alocados para o processo de despoluição pelas autoridades relevantes.

O córrego Charles de Gaulle, localizado no oeste de São Paulo (ver Figura 3), nasce no Parque São Domingos e flui por áreas totalmente urbanizadas, apresentando desafios e oportunidades únicas para esforços de revitalização.

A iniciativa de despoluição beneficia aproximadamente 8.500 moradores e uma população transitória que visita para lazer e envolvimento com a natureza. Ela aborda as necessidades ambientais, sociais e econômicas ao melhorar a qualidade da água, revitalizar as margens do córrego, mitigar os riscos de inundação e aumentar o valor das propriedades. Esses benefícios multifacetados ressaltam a importância do projeto na promoção de um ambiente urbano mais saudável e sustentável.

Os dados de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que indicam melhorias na qualidade da água, foram coletados de análises conduzidas pela empresa de saneamento de São Paulo, Brasil. Os córregos são classificados como não poluídos quando o valor de DBO é igual ou inferior a 30 mg/L (Ratnayaka et al., 2009). Esse limite é crítico para avaliar a eficácia dos esforços de despoluição e garantir que o córrego atenda aos padrões de qualidade ambiental necessários).

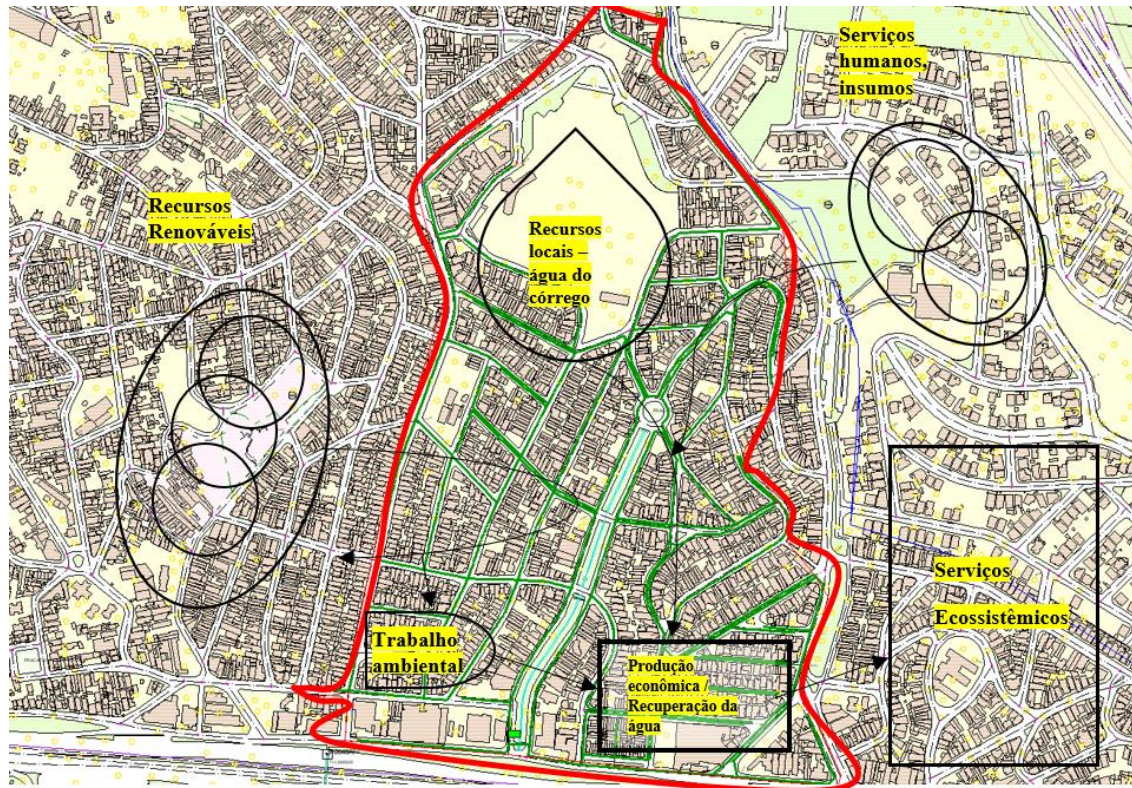
Os dados de precipitação usados nas equações emergéticas foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que fornece informações mensais de precipitação em todo o país (INMET, 2022). Os dados de energia solar para o Brasil foram obtidos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), responsável por medir e disseminar os resultados de energia solar (Pereira et al., 2017). Essa coleta abrangente de dados é vital para aplicar com precisão a avaliação emergética na avaliação da sustentabilidade do processo de revitalização.

Os valores econômicos associados à revitalização do córrego foram coletados da empresa de saneamento de São Paulo (SABESP), que gerencia a remoção de esgoto na área (SABESP, 2011). Além disso, os custos relacionados à manutenção e limpeza de lixo das margens do córrego foram obtidos do governo municipal de São Paulo

(SABESP, 2011).

Figura 3

Diagrama de emergia da bacia do córrego Charles de Gaulle



Procedimento de análise de dados

A estratégia de pesquisa foi baseada em proposições teóricas, levando a um estudo de caso que envolveu seleção, organização e descrição de dados. Identificar os dados usados na avaliação aumenta a compreensão para todas as partes interessadas (Yin, 2010). A pesquisa exploratória delineada na seção 2.2.1 alinha-se com o procedimento proposto por Flausino et al. (2023), destacando a importância dos parâmetros escolhidos na análise do córrego Charles de Gaulle. Essa correlação enfatiza a natureza abrangente da avaliação de emergia e sua relevância para aplicações teóricas e práticas na revitalização de rios urbanos.



Resultados

Com base no diagrama de emergia do córrego apresentado na Figura 1 e na estrutura processual ilustrada na Figura 2, as quantidades de valores de emergia equivalentes são compiladas na Tabela 3. Esta tabela categoriza os fluxos de entrada e saída dos sistemas socioeconômicos e naturais para o ano de 2020 em três grupos distintos: recursos renováveis, recursos não renováveis e recursos adquiridos (incluindo custos de construção e de manutenção). Essas classificações estão em boa concordância com as transformidades definidas por Odum (1996), garantindo consistência e rigor nos cálculos.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que o volume de precipitação impacta significativamente os cálculos de emergia dentro do sistema de córrego urbano, com um valor registrado de $1,17E+14$, destacando os recursos renováveis(R) como um fator crítico no cálculo das transformidades e análise de emergia (Chen et al., 2009).

Além disso, a avaliação de emergias calculadas para recursos não renováveis (N) revela a influência da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) neste indicador. Especificamente, os níveis de DBO medidos antes da despoluição foram de 167 mg/L, enquanto as medições pós-despoluição caíram para 30 mg/L (SABESP, 2011). Essa redução substancial na DBO ressalta a eficácia do processo de despoluição.

A análise de emergia demonstra uma melhoria no processo, conforme indicado pelos valores de emergia calculados para a qualidade da água. A emergia associada à água despoluída é significativamente maior ($2,55E+05$ J) em comparação com a da água poluída ($4,10E+04$ J), refletindo a incorporação de energia aprimorada alcançada por meio dos esforços de despoluição. Essa descoberta enfatiza os resultados positivos do processo de revitalização na qualidade da água e na saúde do ecossistema.

O fluxo econômico (F) utilizado na avaliação emergética deste estudo revela que os gastos associados à construção de redes de esgoto ($1,13E+10$ J) e à manutenção das margens dos córregos ($3,49E+11$ J) contribuem significativamente para os fluxos gerais de recursos alocados para a revitalização do córrego estudado. Esses fatores econômicos têm impacto direto na formulação dos indicadores emergéticos propostos, que são essenciais para analisar a sustentabilidade no processo de despoluição do córrego urbano.





Cálculos de energia do córrego Charles de Gaulle

Este estudo considera a energia solar (E_s), a energia pluvial (E_c) e a energia associada à água poluída (E_{ap}) como parâmetros para recursos naturais renováveis e não renováveis. A energia solar (E_s) e a energia pluvial (E_c) são classificadas como recursos renováveis devido à sua disponibilidade contínua e papel no ciclo hidrológico natural. Em contraste, a energia da água poluída (E_{ap}) é considerada um recurso não renovável, pois sua qualidade degradada indica uma perda de potenciais benefícios ecológicos, necessitando de esforços de remediação para restaurar sua integridade.

Indicadores emergéticos

As transformidades necessárias para desenvolver os cálculos de energia são apresentadas na Tabela 1. Os recursos renováveis (I) utilizados na análise foram a luz solar (energia solar = $1,45E+04$ J/ano) e a chuva (energia da chuva = $6,41E+09$ J/ano), a energia renovável foi considerada como $1,14E+14$ sej/ano. Para os cálculos realizados, o recurso não renovável (N) adotado neste trabalho é a água do córrego poluído, com o volume e a qualidade da água medidos em DBO (demanda bioquímica de oxigênio) no córrego poluído = $1,58E+16$ J/ano. Após o processo de despoluição, o valor de (N) torna-se $4,84E+16$ J/ano. Os recursos financeiros (F) adotados para a avaliação emergética derivam dos custos com implantação do sistema de esgoto $1,13E+10$ J/ano e os custos relacionados à manutenção das margens do córrego e em energia representam $3,49E+11$.

As transformidades necessárias para o desenvolvimento dos cálculos emergéticos estão resumidas na Tabela 1. Os recursos renováveis utilizados na análise incluem luz solar, com valor energético de e precipitação, avaliada em $6,41 E+9$ J/ano. A energia renovável total foi calculada como $1,14 E+14$ sej/ano. Para o recurso não renovável (N) neste estudo, foi determinada a energia associada à água poluída do córrego, com uma DBO medida indicando um valor de $1,58 E+16$ J/ano. Após o processo de despoluição, o valor de energia para o recurso não renovável aumenta para $4,84 E+16$ J/ano. Os recursos financeiros (F) considerados para a avaliação de energia incluem os custos associados à implementação do sistema de esgoto, calculados em



1,13 E+10 J/ano, e os custos de manutenção das margens do córrego, representados como 3,49 E+11 J/ano. Esses valores fornecem uma compreensão abrangente da dinâmica de energia no processo de revitalização do córrego urbano, destacando as dimensões ecológica e econômica.

Os indicadores de energia propostos para avaliar o processo de despoluição do córrego urbano foram calculados conforme detalhado na Seção 4.1. Os indicadores resultantes demonstram uma melhoria significativa na despoluição do córrego urbano, juntamente com uma redução nos custos operacionais associados ao processo. Além disso, esses indicadores destacam o aprimoramento dos serviços ecossistêmicos na região ao redor do córrego estudado.

A aplicação do procedimento de avaliação de energia contribuiu significativamente para o aprimoramento da despoluição do rio urbano, conforme ilustrado na Tabela 1. A análise dos indicadores antes e depois do processo de despoluição revela resultados positivos. Notavelmente, o valor de transformidade (TR) calculado antes da despoluição do córrego é maior (3,86E+11 sej) do que o observado após a revitalização (1,73E+11 sej). Este resultado indica uma melhoria na eficiência do processo, evidenciada pela redução da energia utilizada dentro do sistema (Pan et al., 2020).



Tabela 1

Parâmetros emergéticos do fluxo Charles de Gaulle

Córrego Charles de Gaulle					
Código	Item	Valor (unidades/ano)	Unidade	Transformidade	Energia (sej/ano)
RECURSOS DA NATUREZA (I)					
R1	Sol	1,45E+04	J/ano	1,00E+00	1,45E+04
R2	Chuva	6,41E+09	J/ano	1,82E+04	1,17E+14
RECURSOS NÃO RENOVÁVEIS (N) Tabela 3 – Parâmetros emergéticos córrego Charles de Gaulle					
N	Água do córrego com esgoto	3,86E+11	J/ano	4,10E+04	1,58E+16
N	Água do córrego sem esgoto	1,90E+11	J/ano	2,55E+05	4,84E+16
RECURSOS UTILIZADOS (F)					
S1	Custos com redes de esgoto	2,82E+03	U\$/ano	4,00E+06	1,13E+10
S2	Custos com manutenção das margens	8,72E+04	U\$/ano	4,00E+06	3,49E+11
EMERGIA TOTAL UTILIZADA (Y)					
Y	Soma das emergias utilizadas córrego sujo				1,59E+16
Y	Soma das emergias utilizadas córrego limpo				4,85E+16
Energia do produto (Ep) e cálculo de sua transformidade (Tr)					
Ep	ÁGUA DESPOLUÍDA	5,69E+10	J/ano	2,80E+05	
RESULTADO SEM ALTERAÇÃO DA DBO					
Ep	ÁGUA POLUÍDA	3,86E+11	J/ano	4,13E+04	

O índice de renewability calculado (R) demonstra um aumento significativo ao longo do período estudado, aumentando de 4,16E+08 antes da despoluição para



2,82E+09 após a despoluição. Esses resultados indicam que a revitalização aumenta a sustentabilidade do sistema, conforme evidenciado pelo aumento da renewability ao longo do tempo (Odum, 1996). Além disso, a avaliação do índice de rendimento emergético (EYR) produz um valor de 4,43E+04 sej antes da despoluição, que aumenta para 1,35E+05 sej após o processo. Esse aumento significa que a sociedade obtém maiores benefícios da revitalização, tornando o uso efetivo dos recursos economicamente viável (Sun et al., 2019), conforme detalhado na Tabela 2.

A análise do estresse associado ao uso de recursos renováveis, especificamente água de córregos, é quantificada usando a taxa de carga ambiental (ELR). Os resultados obtidos da avaliação do processo de despoluição do córrego indicam uma redução significativa no estresse ambiental, com valores de 7,39E-03 sej antes da despoluição e 2,42E-03 sej após a revitalização. Essa redução ressalta o impacto positivo dos esforços de despoluição na saúde do corpo d'água (Su et al., 2013).

O índice de investimento em emergia (EIR) avaliado durante a despoluição do córrego estudado revela uma diminuição notável na intensidade da emergia associada ao processo. Especificamente, o EIR diminuiu de 2,28E-05 sej antes da revitalização para 7,44E-06 sej após os esforços de revitalização. Esses resultados indicam que o processo de despoluição está fazendo uma contribuição positiva para a sustentabilidade ambiental.

**Tabela 2***Indicadores de emergia do córrego Charles de Gaulle*

INDICADOR	FÓRMULA	UNIDADE	RESULTADO POLUÍDO	RESULTADO DESPOLUÍDO
Transformidade	$TR = Y/J_{saída}$	1	3,86E+11	1,73E+11
Renovabilidade	$\%R = R/Y$	1	0,74%	32,86%
Razão de rendimento em emergia	$EYR = Y/F$	1	4,43E+04	1,35E+05
Taxa de carga ambiental	$ELR = (F+N)/R$	1	7,39E-03	2,42E-03
Razão de investimento de emergia	$EIR = F / I$	1	2,28E-05	7,44E-06
Índice de sustentabilidade ambiental	$ESI = EYR/ELR$	1	5,99E+06	5,57E+07
Razão de troca em emergia	$EER = Y/(\$ * EIR)$	sej/\$	4,97E+15	4,62E+16

Os resultados da avaliação de emergia conduzida na bacia do córrego Charles de Gaulle indicam que os investimentos feitos contribuíram significativamente para a sustentabilidade do local. Antes do processo de despoluição, o índice de sustentabilidade ambiental (ESI) foi medido em 5,99E+06 sej. Após os investimentos, o ESI aumentou para 5,57E+07 sej, demonstrando uma melhoria substancial na sustentabilidade local. Este impacto positivo ressalta a eficácia dos investimentos em facilitar o processo de despoluição.

Os cálculos conduzidos para determinar a taxa de troca em emergia (EER) demonstram a utilização eficiente dos recursos alocados para o processo de despoluição do córrego. Inicialmente, o EER foi registrado em 4,97E+15 sej/\$. Após as melhorias, este valor aumentou para 2,73E+06 sej/\$, indicando uma utilização mais eficaz dos recursos sem exacerbar o estresse no ecossistema aquático. Esta análise ressalta o impacto positivo dos esforços de revitalização na eficiência de recursos e sustentabilidade ambiental (Wu et al., 2019).



Avaliação da emergia e serviços ecossistêmicos

A análise de serviços regulatórios usando indicadores de emergia aprimora a avaliação de sustentabilidade do processo de despoluição de rios urbanos ao esclarecer os impactos ambientais diretos na bacia do córrego Charles de Gaulle. O foco na melhoria da qualidade da água enquanto mitiga a poluição e o acúmulo de sedimentos ajuda a reduzir o risco de inundações (Pan et al., 2020). Além disso, melhorias na qualidade da água e valores de emergia relacionados aos serviços ecossistêmicos regulatórios afetam positivamente a qualidade do ar, a produção de oxigênio e a conservação do solo, prevenindo assim a erosão.

Os serviços ecossistêmicos de suporte derivados da avaliação emergética indicam que a qualidade da água melhorada e o aumento da emergia devido à revitalização regulam significativamente as populações de pragas, protegem contra a radiação solar UV e preservam a biodiversidade e a herança genética (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Essas melhorias são cruciais para manter o equilíbrio ecológico e a resiliência do ecossistema.

Os resultados na Tabela 3, calculados usando as Equações 14 e 15, ilustram uma melhoria significativa na prestação de serviços ecossistêmicos devido à despoluição do córrego Charles de Gaulle. Essas descobertas destacam o impacto positivo dos esforços de revitalização na saúde ecológica do córrego e os benefícios para a comunidade ao redor.

Tabela 3

Serviços ecossistêmicos

CONDIÇÃO DO CÓRREGO	SE SUPORTE	SE REGULAÇÃO
CÓRREGO LIMPO	4,14E+20	5,74E+12
CÓRREGO POLUÍDO	1,35E+20	4,00E+12



Análise de sensibilidade de indicadores emergéticos

A análise de sensibilidade melhorou significativamente a avaliação da sustentabilidade do processo de despoluição do córrego ao identificar pontos críticos para atingir a sustentabilidade. Essa abordagem mostra que a teoria emergética permite uma análise abrangente de cada ação tomada e auxilia os tomadores de decisão na otimização da alocação de recursos para esforços de revitalização (Oliveira Neto et al., 2017). Neste estudo, a análise de sensibilidade envolveu parâmetros emergéticos gradualmente variáveis, influenciando diretamente os indicadores emergéticos usados para avaliar a sustentabilidade (Oliveira Neto et al., 2017).

Os dados nas Figuras 4, 5, 6 e 7 foram normalizados com base em seus atributos (ver Tabelas 2 e 3) usando uma equação de banco de dados, permitindo que os valores variem de 0 a 1 (Equação 5).

$$X_{\text{norm}} = \frac{(x_i - x_{\text{min}})}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$$

A Figura 4 ilustra a evolução dos indicadores de renewability e taxa de produção de energia, ao mesmo tempo em que descreve um declínio na transformabilidade juntamente com um aumento na energia total. Essa tendência indica uma melhoria na sustentabilidade, conforme evidenciado pelo consumo reduzido de energia útil dentro do sistema. Isso destaca que o ambiente requer menos recursos para sustentar sua qualidade.



Figura 4

Análise de sensibilidade de emergia, transformabilidade, taxa de produção de emergia e renewability

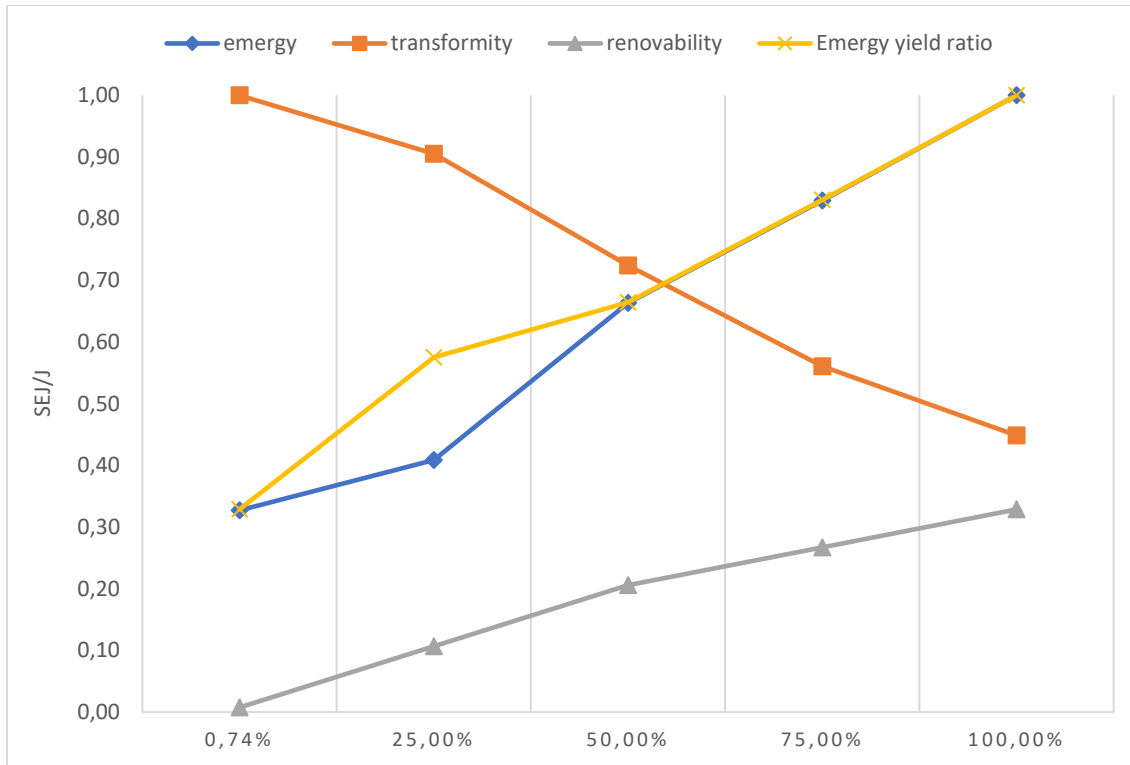
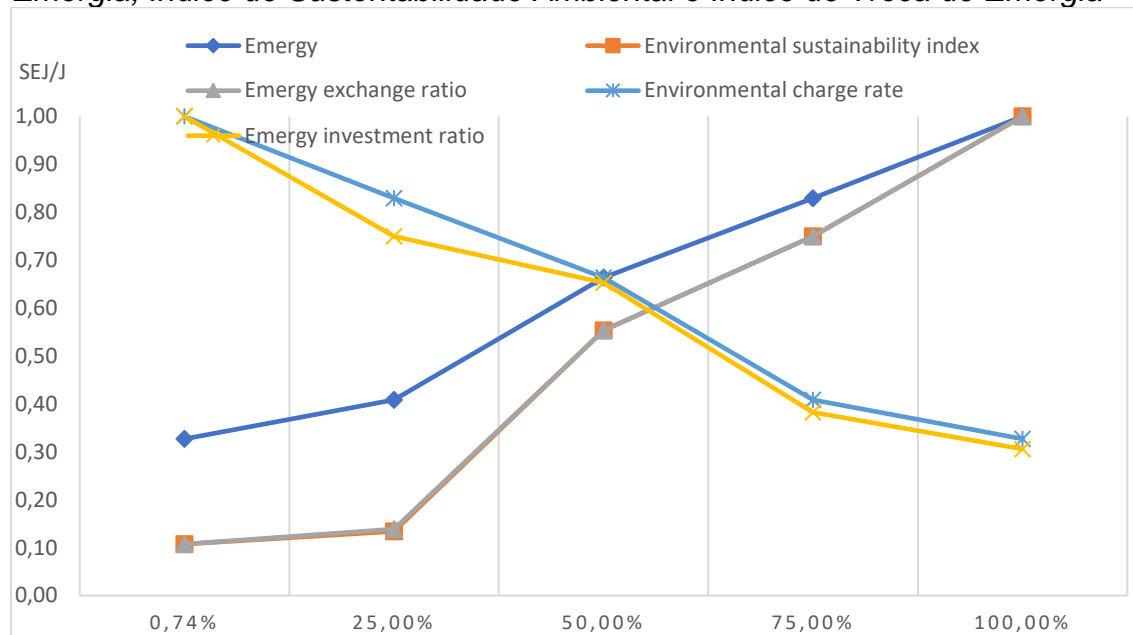


Figura 5

Análise de sensibilidade da emergia, Taxa de Carga Ambiental, Índice de Investimento Emergia, Índice de Sustentabilidade Ambiental e Índice de Troca de Emergia



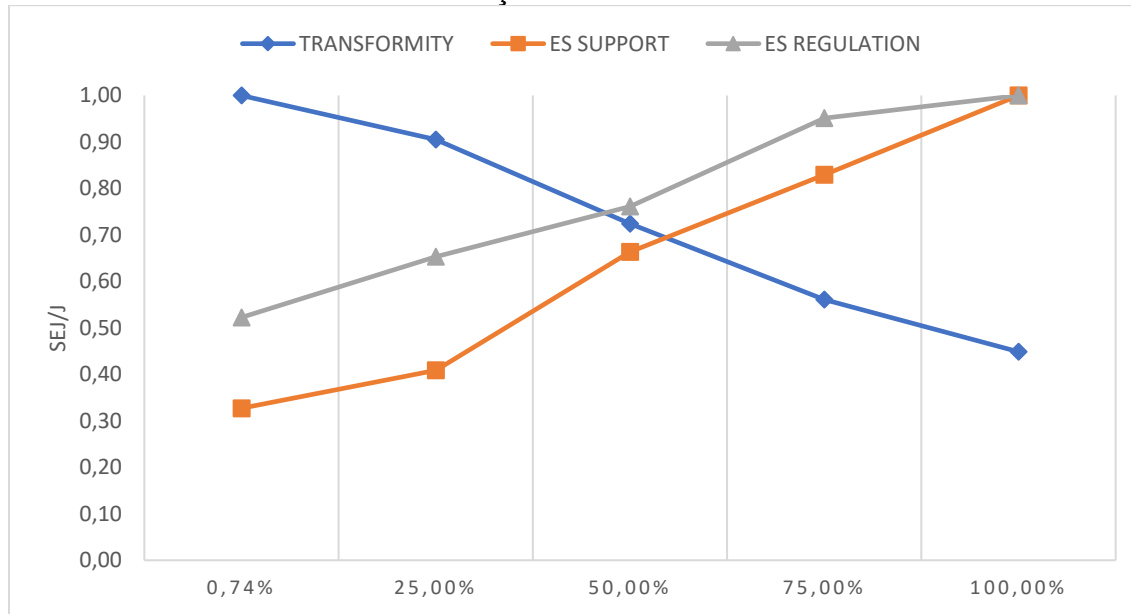
A Figura 5 ilustra as relações entre os indicadores de emergia que exibem um declínio — especificamente, a Taxa de Câmbio Ambiental e a Taxa de Investimento de Emergia — e aqueles que demonstram um aumento, como o Índice de Sustentabilidade Ambiental e a Taxa de Câmbio de Emergia. A análise deste gráfico indica um aumento geral na emergia dentro do sistema como resultado das ações tomadas para a despoluição do córrego. Notavelmente, esta tendência reflete uma redução no estresse ambiental, caracterizada pela diminuição do consumo de energia útil e diminuição da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) necessária para a restauração do local. Essa melhoria é ainda mais apoiada pela sustentabilidade local aprimorada e um índice de troca de emergia mais favorável associado aos recursos gastos.

Os serviços ecossistêmicos quantificados por meio da avaliação de emergia conduzida neste estudo são descritos na Figura 6, que ilustra a progressão no fornecimento de serviços ecossistêmicos regulatórios e de suporte. O gráfico destaca um declínio nos aspectos transformacionais do sistema estudado, indicando que com a melhoria da qualidade da água no córrego, há um aumento correspondente na sustentabilidade. Como resultado, os indicadores de emergia demonstram crescimento,

enquanto o consumo de energia dentro do sistema é notavelmente reduzido. Isso reflete uma trajetória positiva em direção à melhoria da saúde ecológica e da eficiência de recursos, ressaltando o impacto benéfico dos esforços de revitalização.

Figura 6

Análise de sensibilidade dos Serviços Ecossistêmicos e Transformidade



Discussão

As descobertas apresentadas aqui ilustram os resultados da emergia visando melhorar o processo de despoluição do córrego Charles de Gaulle. É importante reconhecer que existem várias abordagens na literatura científica sobre a aplicação da emergia em questões relacionadas à água. Por exemplo, Chen et al. (2009) focam na valoração de rios para abastecimento de água, enquanto Wu et al. (2009, 2019) exploram aspectos ambientais dentro de bacias hidrográficas. No entanto, este estudo oferece uma contribuição significativa ao aplicar a teoria da emergia em um novo contexto, visando especificamente a despoluição de córregos urbanos. Esta abordagem amplia a possibilidade de execução das avaliações de emergia em outros contextos e pretende difundir nossa compreensão a respeito de práticas sustentáveis para a gestão de água em ambientes urbanos.

Para responder à questão de pesquisa que este estudo visa, a saber, identificar a



viabilidade de aplicar indicadores de emergia em processos de descontaminação de rios urbanos, adotamos uma abordagem inovadora que não apenas expande a aplicabilidade das avaliações de emergia, mas também, melhora nossa compreensão sobre as práticas sustentáveis para uma eficiente gestão de água em ambientes urbanos.

A avaliação de emergia serve como uma ferramenta valiosa para desenvolver indicadores práticos que podem ser monitorados ao longo do tempo. Esses indicadores de emergia ilustram efetivamente o impacto dos investimentos feitos na revitalização de córregos urbanos. Além disso, eles destacam a relação entre a população local e o ambiente melhorado, enfatizando a importância dos serviços ecossistêmicos que são perceptíveis para a comunidade. Isso inclui serviços regulatórios, que gerenciam a qualidade ambiental, e serviços de suporte que mantêm o equilíbrio ecológico. Ao demonstrar essas conexões, a avaliação de emergia não apenas auxilia na avaliação da eficácia dos esforços de revitalização, mas também, promove o engajamento e a conscientização da comunidade sobre os benefícios de um ecossistema mais saudável.

O desenvolvimento de novas ferramentas para melhorar os processos de revitalização de rios urbanos está conectado às demandas sociais relacionadas à melhoria da qualidade de vida da população, bem como à integração de corpos d'água tratados na comunidade. Isto é ilustrado por Flausino e Gallardo (2021), que apresentaram mudanças nas percepções dos moradores da área do córrego Charles de Gaulle em relação ao local revitalizado.

A avaliação emergética contribui para o processo de despoluição dos córregos, como encontrado na aplicação do córrego Charles de Gaulle, Brasil apresentando a melhoria da eficiência do processo de revitalização de acordo com os indicadores emergéticos adotados: transformidade (TR) antes do processo ($3,86E+11$ J) e após a revitalização ($1,73E+11$ J). O índice de renewability (R) antes da despoluição ($4,16E+08$ sej) e após a despoluição ($2,82E+09$ sej), índice de emergia (EYR) antes da despoluição ($4,43E+04$ sej) e após o processo ($1,35E+05$). Pesquisas sobre o tema indicam que Su, et.al. (2013) utilizaram a emergia para verificar o impacto de ações de limpeza urbana e controle populacional, assim como Zhang, et.al. (2017) propuseram o uso da emergia para avaliação de saúde em corpos hídricos e Pulselli, et.al. (2011) apresentaram a necessidade da avaliação emergética em questões de perdas de água, assim como a



análise do ambiente em regiões urbanas realizada por Lv, et.al. (2020).

No entanto, os estudos citados não apresentaram os indicadores supracitados no contexto específico de descontaminação de rios urbanos. O objetivo deste artigo é demonstrar a eficácia desses indicadores na aplicação da emergia em processos de revitalização.

A avaliação emergética desempenha um papel crucial na potencialização dos processos de despoluição de córregos, como demonstrado no caso do córrego Charles de Gaulle no Brasil. Esta avaliação revela uma melhora significativa na eficiência do processo de revitalização, refletida em vários indicadores emergéticos. Especificamente, a Transformidade (TR) diminuiu de $3,86E+11$ J antes do processo de revitalização para $1,73E+11$ J depois. Além disso, o Índice de renewability (R) mostrou crescimento substancial, aumentando de $4,16E+08$ sej antes da despoluição para $2,82E+09$ sej após a despoluição. Da mesma forma, a Razão de Rendimento de Emergia (EYR) melhorou de $4,43E+04$ sej antes da intervenção para $1,35E+05$ após o processo de revitalização.

Mais pesquisas nesta área ressaltam a utilidade das avaliações de emergia. Por exemplo, Su et al. (2013) empregaram a emergia para avaliar os efeitos de iniciativas de limpeza urbana e controle populacional. Da mesma forma, Zhang et al. (2017) defenderam a aplicação da emergia em avaliações de saúde de corpos d'água, enquanto Pulselli et al. (2011) destacaram a necessidade crítica de avaliações emergéticas para abordar questões relacionadas à perda de água. Além disso, Lv et al. (2020) conduziram análises de condições ambientais em áreas urbanas usando estruturas emergéticas. Coletivamente, esses estudos ilustram o potencial significativo da avaliação emergética na promoção de práticas de gestão sustentáveis para sistemas hídricos urbanos.

O aprimoramento na avaliação de investimentos relacionados ao processo de despoluição do córrego Charles de Gaulle no Brasil foi efetivamente demonstrado por meio da avaliação emergética conduzida neste estudo. Os resultados indicam uma melhoria substancial no Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI), que aumentou de $5,99E+06$ sej antes do processo de despoluição para $5,57E+07$ sej depois, refletindo um aprimoramento notável na sustentabilidade local. Além disso, a análise da Taxa de Troca Emergética (EER) destaca a eficiência dos recursos alocados para o processo de revitalização ess. Inicialmente medido em $4,97E+15$ sej/\$, o EER melhorou



significativamente para $2,73E+06$ sej/\$ após a revitalização. Esse declínio no EER indica um uso mais eficiente dos recursos de energia, demonstrando a eficácia dos investimentos feitos nos esforços de despoluição do córrego.

A aplicação da análise de sensibilidade neste estudo ressalta a eficácia dos indicadores de energia propostos por Odum (1996) no aumento da sustentabilidade durante o processo de despoluição do córrego. Além disso, a análise integrada desses indicadores revela os efeitos prejudiciais da urbanização inadequada no meio ambiente, conforme observado por Zhong et al. (2018).

A representação gráfica dos indicadores de energia, juntamente com sua relação com o suporte e a regulamentação dos serviços ecossistêmicos, fornece uma estrutura sistemática para os tomadores de decisão avaliarem o processo de revitalização. Essa abordagem destaca o impacto positivo que a utilização eficiente da energia tem na restauração de rios urbanos, alinhando-se com as descobertas de Pan et al. (2020).

Conseqüentemente, as partes interessadas responsáveis pela implementação de iniciativas de revitalização podem estender seu monitoramento além de meras avaliações da qualidade da água. Elas podem utilizar indicadores abrangentes que facilitam uma avaliação completa de todo o sistema e dos investimentos feitos, garantindo assim uma abordagem mais holística à gestão ambiental.

Os resultados da análise de sensibilidade facilitam a identificação de aspectos mais amplos incorporados ao processo de despoluição, particularmente os resultados tangíveis de investimentos correlacionados com a melhoria ambiental.

Do ponto de vista teórico, a aplicação simultânea de análise de sensibilidade e cálculos de indicadores de energia oferece uma nova perspectiva sobre a utilização da energia como um método avaliativo para processos de despoluição de rios urbanos, conforme descrito no procedimento proposto por Flausino et al. (2023). Essa abordagem inovadora não apenas aprimora a compreensão das interrelações entre investimentos e resultados ambientais, mas também, estabelece uma estrutura robusta para avaliar a sustentabilidade dos esforços de revitalização em hidrovias urbanas.

Conclusão

Com base na avaliação de energia aplicada à despoluição do córrego Charles de



Gaulle, várias considerações importantes foram identificados em relação à otimização do processo de revitalização, à capacidade de redução de custos e à avaliação da sustentabilidade no local.

As principais conclusões são as seguintes:

(1) Integração de sistemas ecológicos e econômicos:

A avaliação de emergia destaca a interconexão dos sistemas ecológicos e econômicos. Ao avaliar recursos renováveis e não renováveis, o estudo aprimora a alocação de recursos humanos ao mesmo tempo em que facilita a despoluição. Essa abordagem oferece uma estrutura para pesquisas futuras em gestão de águas urbanas, otimizando processos de revitalização.

(2) Por meio do exame da melhoria da qualidade da água no córrego estudado, os efeitos e influências positivas nos ambientes econômico, social e ecológico podem ser articulados de forma abrangente. Os resultados indicam que as vantagens desta análise integrada abrangem:

- (a) Melhorias na gestão de recursos utilizados para despoluição de córregos, por meio das quais a avaliação emergética estabelece condições para a viabilidade econômica do processo e facilita o monitoramento contínuo dos esforços de revitalização por meio dos indicadores desenvolvidos.
- (b) Os indicadores emergéticos derivados dos índices de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (qualidade da água) permitem uma avaliação abrangente do processo de despoluição, abrangendo todos os aspectos associados ao córrego. Isso contribui para o desenvolvimento de indicadores que visam minimizar o estresse no corpo d'água em um ambiente totalmente urbanizado.
- (c) Melhorias no relacionamento entre a população local e a área revitalizada. O ambiente restaurado promove a interação entre humanos e natureza, e essa dinâmica pode ser efetivamente monitorada por meio dos indicadores de serviços ecossistêmicos estabelecidos no estudo.

(3) O modelo de avaliação emergética, aprimorado pela análise de sensibilidade neste estudo, permite um exame completo dos fatores que afetam a despoluição do rio



urbano. Ao converter várias unidades — como valores monetários (\$), volume (m³) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (mg/L) — em emergia (sej), o modelo calcula indicadores que monitoram a progressão do processo de despoluição. Essa abordagem unificada fornece uma avaliação abrangente dos elementos interconectados da revitalização de rios urbanos, facilitando a análise das dimensões ecológica, econômica e social simultaneamente.

(4) O estudo de caso do córrego Charles de Gaulle mostra que melhorias contínuas e a incorporação de novos parâmetros de controle podem gerenciar de forma sustentável os custos de despoluição e manutenção da qualidade da água. Além disso, o uso de indicadores de emergia para monitoramento captura efetivamente a dinâmica dos serviços ecossistêmicos, oferecendo avaliações valiosas sobre a viabilidade ecológica e econômica dos esforços de revitalização.

(5) A aplicação da avaliação de emergia na análise do processo de despoluição de um córrego urbano, complementada por apresentações gráficas derivadas da análise de sensibilidade, ilustra o impacto significativo das emergias calculadas na sustentabilidade dos esforços de revitalização. Em essência, a utilização de indicadores de emergia facilita o controle efetivo do processo, mostra os resultados da despoluição através das lentes da sustentabilidade e contribui para o avanço da teoria de emergia dentro de uma área relativamente inexplorada de investigação científica.

A principal limitação deste estudo reside em sua natureza como uma única investigação exploratória, que inerentemente carece de generalização. No entanto, como o estudo inaugural sobre este tópico, ele oferece uma contribuição significativa para o campo. Nesse sentido, pesquisas futuras são encorajadas a aplicar os cálculos de emergia juntamente com os indicadores identificados a outros estudos de caso, facilitando assim análises comparativas que podem melhorar a compreensão e a aplicabilidade das avaliações de emergia em vários contextos.

Referências

Anin, D. O., & Banahene, P. (2021). Urbanization and stream ecosystems: The role of flow hydraulics towards an improved understanding in addressing urban stream





degradation. *Environmental Reviews*, 29(3), 401–414. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0063>

Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2002). Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 10(4), 321-334. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00043-9)

Chen, D., Chen, J., Luo, Z., & Lv, Z. (2009). Emergy evaluation of the natural value of water resources in Chinese rivers. *Environmental Management*. DOI:[10.1007/s00267-009-9320-x](https://doi.org/10.1007/s00267-009-9320-x)

Di, D., Wu, Z., Guo, X., Lv, C., & Wang, H. (2019). . alue stream analysis and emergy evaluation of the water resource eco-economic system in the Yellow River Basin. *Water*, 11(4), 710. *Water* 2019, 11(4), 710; <https://doi.org/10.3390/w11040710>

Flausino, F. R., & Gallardo, A. L. C. F. (2021). Oferta de serviços ecossistêmicos culturais na despoluição de rios urbanos em São Paulo. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 13, e20200155. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200155>

Flausino, F. R., Oliveira Neto, G. C., & Librantz, A. F. H. (2023). Procedure for emergetic assessment in urban river de-pollution. *Water Science and Technology*, 88(8), 2068. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.318>

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br> <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em 29 de julho de 2022.





- Li, H., Lv, C., Ling, M., Gu, C., Li, Y., Wu, Z., & Yan, D. (2021). Emergy analysis and ecological spillover as tools to quantify ecological compensation in Xuchang City, Qingyi River Basin, China. *Water*, 13(4), 414. DOI:[10.3390/w13040414](https://doi.org/10.3390/w13040414)
- Liu, W., Zhan, J., Zhao, F., Yan, H., Zhang, F., & Wei, X. (2019). Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 98, 228-238. DOI [10.1016/j.ecolind.2018.10.054](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.054)
- Lv, C., Ling, M., Guo, X., Di, D., & Zhou, H. (2018). Evaluation method of water resource contribution rate in terms of emergy. In *Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering (IWEMSE 2018)* (pp. 34-41). <https://www.scitepress.org/Papers/2018/75568/75568.pdf>
- Lv, H., Guan, X., & Meng, Y. (2020). Study on economic value of urban land resources based on emergy and econometric theories. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 1019–1042. DOI: [10.1007/s10668-019-00573-4](https://doi.org/10.1007/s10668-019-00573-4)
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington, DC. ISBN 1-59726-040-1
- Nahiduzzaman, K. M., & Sadiq, R. (2023). Planejamento e gestão de água e infraestrutura hídrica sob estresse climático. *Environmental Reviews*, 31(1), 1-3. <https://doi.org/10.1139/er-2022-0127>
- Odum, H.T. (1996). *Environmental accounting, EMERGY, and decision making*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-11442-0
- Odum, H.T., & Odum, E.C. (2001). *Prosperous way down: Principles and policies* (1st ed.). Brasil: Editora Vozes. ISBN: 978-0-87081-908-7



Oliveira Neto, G. C., Oliveira, J. C., & Librantz, A. F. H.

Selection of logistic service providers for the transportation of refrigerated goods.

Production Planning & Control: The Management of Operations.

<https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1319986>

Pan, Y., Zhang, B., Wu, Y., & Tian, Y. (2020).

Sustainability assessment of urban ecological-economic systems based on emergy analysis: A case study in Simao, China. *Ecological Indicators*, 121, 107157. [https://doi.org/\[inserir DOI\]](https://doi.org/[inserir DOI])

Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. L., Ruther, R., Abreu, S. L., Tiempolo, G. M., Pereira, S. V., & Souza, J. G. (2017).

Atlas brasileiro de energia solar (2nd ed.). São José dos Campos: INPE.

<http://doi.org/10.34024/978851700089>

Pulselli, F. M., Patrizi, N., & Focardi, S. (2011). Calculation of the unit emergy value of water in an Italian watershed. *Ecological Modelling*, 222(16), 2929-2938. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.04.021

Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J., & Johnson, K. M. (2009). Chemistry, microbiology, and biology of water. In *Water supply* (pp. 195–266). [https://doi.org/10.1016/b978-0-](https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-6843-9.00014-7)

[7506-6843-9.00014-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-6843-9.00014-7)

SABESP (2011). *Programa Córrego Limpo - 100 Córregos 2007 – 2010*. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. pp. 01–151.

Song, F., Su, F., Zhu, D., Li, L., Li, H., & Sun, D. (2019). Evaluation and driving factors of sustainable development of the wetland ecosystem in Northeast China: An



emergy approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119236.

DOI:[10.1016/j.jclepro.2019.119236](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119236)

- Song, F., Su, F., Mi, C., & Sun, D. (2021). Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. *Science of The Total Environment*, 751, 141778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141778>
- Su, M., Fath, B. D., Yang, Z., Chen, B., & Liu, G. (2013). Ecosystem health pattern analysis of urban clusters based on emergy synthesis: Results and implication for management. *Energy Policy*, 59, 600–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141778>
- Sun, J., Yuan, X., Liu, G., & Tian, K. (2019). Emergy and eco-exergy evaluation of wetland restoration based on the construction of a wetland landscape in the northwest Yunnan Plateau, China. *Journal of Environmental Management*, 252, 109499. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.109499](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109499)
- Sun, J., Yuan, X., Liu, H., & Liu, G. (2021). Emergy and eco-exergy evaluation of wetland reconstruction based on ecological engineering approaches in the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Indicators*, 122, 107278. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107278>
- Wang, C., Li, X., Yu, H., & Wang, Y. (2019). Tracing the spatial variation and value change of ecosystem services in the Yellow River Delta, China. *Ecological Indicators*, 96, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.015>
- Wu, Z, Di, D, Wang, H*, Wu, M, He, C. Analysis and emergy assessment of the eco-environmental benefits of rivers. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105472. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105472>



- Yin, R Y. (2010). *Estudo de caso – planejamento e métodos* (4th ed.). Porto Alegre: Bookman. ISBN-10, 8577806553
- Zeng, R., Zhao, Y., & Yang, Z. (2010). Emergy-based health assessment of Baiyangdian watershed ecosystem in temporal and spatial scales. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 359–371. DOI:[10.1016/j.proenv.2010.10.041](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.041)
- Zhan, J., Zhang, F., Chu, X., Liu, W., & Zhang, Y. (2018). Ecosystem services assessment based on emergy accounting in Chongming Island, Eastern China. *Ecological Indicators*, 105, 464-473. DOI:[10.1016/j.ecolind.2018.04.015](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.015)
- Zhang, J., Fu, Y. C., Shi, W. L., & Guo, W. X. (2017). A method for estimating watershed restoration feasibility under different treatment levels. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(5), 1232–1240. DOI:[10.2166/ws.2017.017](https://doi.org/10.2166/ws.2017.017)
- Zhong, S., Geng, Y., Kong, H., Liu, B., Tian, X., Chen, W., & Ulgiati, S. (2018). Emergy-based sustainability evaluation of Erhai Lake Basin in China. *Journal of Cleaner Production*, 178, 142–153. DOI:[10.1016/j.jclepro.2018.01.019](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.019)



Apêndice A

Revisão sistemática sobre avaliação emergética e recursos hídricos

Autor	ano	País	Método	Economia	Sociedade	Meio ambiente	Aplicação de energia
Li, et.al. 2021	2021	China	Estudo de caso			mudanças de grande impacto na compensação ecológica	Avaliação SE
Song, et.al. 2021	2021	China	Estudo de caso	Desenvolvimento econômico regional e taxa de urbanização		Efeito positivo na melhoria dos ESVs de zonas húmidas	Avaliação SE
Wang, et.al. 2019	2019	China	Estudo de caso	Valores de conservação e manutenção do solo			Avaliação SE
Liu, et.al. 2019	2019	China	Modelo experimental	Importância para a economia e o desenvolvimento.	Comunicação de facilidades entre as partes interessadas e os decisores políticos		Avaliação SE
Zeng, et.al. 2010	2010	China	Modelo experimental	Aumento contínuo das necessidades de desenvolvimento económico			Avaliação SE
Sun, et.al. 2021	2021	China	Modelo experimental			A energia demonstrou ser adequada para avaliar os efeitos do projeto de restauração de zonas úmidas.	Sustentabilidade e revitalização de zonas húmidas



Autor	ano	País	Método	Economia	Sociedade	Meio ambiente	Aplicação de energia
Song, et.al. 2019	2019	China	Estudo de caso	Os recursos adquiridos externamente se tornaram a parte mais importante da energia total usada na área de estudo.		Os recursos renováveis têm demonstrado uma contribuição positiva para o desenvolvimento de zonas úmidas.	Sustentabilidade e revitalização de zonas húmidas
Sun, et.al. 2019	2019	China	Estudo de caso	O ecossistema das zonas húmidas após a restauração depende principalmente de recursos renováveis do ambiente local.		A integridade ecológica dos ecossistemas das zonas húmidas deve ser restaurada tanto quanto possível	Sustentabilidade e revitalização de zonas húmidas
Zhan, et.al. 2018	2018	China	Modelo experimental	Aumento do custo do solo urbano		Mudanças no uso e cobertura do solo e perda da função SE e degradação ambiental	Sustentabilidade e revitalização de zonas húmidas
Di, et.al. 2019	2019	China	Modelo experimental		Aplicação dos recursos hídricos na vida social e no ambiente ecológico manter o ambiente ecológico	É necessário evitar a deterioração do meio ambiente causada pela intrusão de água industrial.	Valoração dos recursos hídricos
Lv, et.al. 2018	2018	China	Modelo experimental			A taxa de contribuição dos recursos hídricos calculada pelo método emergético mostrou-se útil para	Valoração dos recursos hídricos





Autor	ano	País	Método	Economia	Sociedade	Meio ambiente	Aplicação de energia
						avaliar os reais benefícios e contribuições dos recursos hídricos	
Chen, et.al. 2009	2009	China	Modelo experimental	Portanto, esse método fornece novos insights sobre toda a economia chinesa e o valor da água do rio.			Valoração dos recursos hídricos
Pan, et.al. 2020	2020	China	Estudo de caso		É imperativo tomar medidas mais sustentáveis através do equilíbrio entre proteção ecológica e crescimento econômico.	Enormes contribuições do ecossistema natural de Simão para benefício humano	Sustentabilidade em áreas urbanas
Su, et.al. 2013	2013	China	Modelo experimental		Estabelecer esquemas de gestão adequados de acordo com as condições específicas do ecossistema urbano	Reduzir a dependência de insumos externos de energia e materiais.	Sustentabilidade em áreas urbanas
Zhang, et.al. 2017	2017	China	Modelo experimental			Mitigar os danos ecológicos e fornecer ações de proteção positivas para avaliar a saúde do rio.	Sustentabilidade e revitalização em bacias hidrográficas



Autor	ano	País	Método	Economia	Sociedade	Meio ambiente	Aplicação de energia
Pulselli, et.al. 2011	2011	Italy	Estudo de caso	A análise de investimentos mostrou que as perdas de água influenciam os indicadores de energia.			Sustentabilidade e revitalização em bacias hidrográficas
Lv, et.al. 2020	2020	China	Estudo de caso	O resultado mostrou que o solo urbano destinado à construção é o que apresenta maior valor econômico.		O modelo pode melhorar o sistema de contabilidade do valor dos recursos do solo urbano.	Plano geral de uso do solo
Wu, et.al. 2019	2019	China	Modelo experimental		Promover a construção de uma sociedade que economize água e realize a coordenação do desenvolvimento sustentável na sociedade econômica	Benefícios ecoambientais efetivamente com a contribuição e benefícios dos recursos hídricos dos rios no ecossistema.	Avaliação ecoambiental em rios
Zhong, et.al. 2018	2018	China	Estudo de caso		Gestão sustentável de bacias hidrográficas considerando as realidades locais.		Sustentabilidade em bacias hidrográficas