

# EXPLORANDO O NEXO ALIMENTO-RESÍDUO-ENERGIA NO CONTEXTO UNIVERSITÁRIO: COMPARAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS ENTRE CHINA E BRASIL

## 1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade no ambiente universitário tem se consolidado como campo de interesse na literatura científica, sobretudo ao longo das últimas décadas, em virtude dos impactos ambientais gerados pelos campi, bem como pelo seu potencial de subsidiar iniciativas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (GIUSTI et al., 2024; WANG et al., 2023). Esse debate enfatiza a relevância de se integrar princípios socioambientais à gestão dessas organizações de forma a contribuir com a construção de uma agenda global de sustentabilidade.

As preocupações com as mudanças climáticas têm sido debatidas globalmente. Na China, maior emissor de Gases do Efeito Estufa (GEE), o setor educacional emitiu 246 milhões de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> em 2017 (WANG et al., 2023). O país estabeleceu metas ambiciosas para o controle das mudanças climáticas, comprometendo-se a alcançar o piso de suas emissões até 2030 e assim, a neutralidade de carbono até 2060 (JIANG et al., 2022; JIA, LIN, 2021).

Giusti et al. (2023) apontam que padrões de consumo como aqueles relacionados à alimentação contribuem para os impactos ambientais e sociais nas Instituições de Ensino Superior (IES), assim como a gestão de resíduos. Wang et al. (2023) enfatizam que os resíduos são fontes de emissões de carbono em um campus universitário e indicam a reciclagem como uma das estratégias de mitigação para alcançar a neutralidade de carbono nas IES.

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) configura-se como uma ferramenta de gestão alinhada aos ODS (GIUSTI et al., 2024), que pode contribuir na avaliação do desempenho ambiental dos campi e na identificação de *hotspots* ambientais, apoiando gestores no processo de tomada de decisões. Fundamentada pela NBR ISO 14040/44 (ABNT, 2009, 2009a), sendo composta pelas etapas de definição de objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos do ciclo de vida e pela interpretação dos resultados (OLIVEIRA et al., 2024). Isto posto, o objetivo deste trabalho é realizar uma ACV atribucional para analisar impactos ambientais associados a uma aula presencial realizada em um campus de médio porte localizado no leste da China, posteriormente otimizado a partir de cenários traçados a partir do contexto do Brasil, e com foco no nexo alimento-resíduo-energia.

## 2 METODOLOGIA

Este trabalho de ACV utilizou para a modelagem o *software OpenLCA 2.4.1*. Para a extração dos dados de *background* foram utilizadas as bases *Agribalyse 3.0*, *ELCD 3.0* e *Ecoinvent 3*, complementados por dados secundários da literatura (WANG et al., 2023; GIUSTI et al., 2023).

### 2.1 OBJETIVO, ESCOPO, UNIDADE FUNCIONAL E FRONTEIRAS DO SISTEMA

Objetivou-se a avaliação de impactos ambientais associados a uma aula presencial em uma universidade chinesa (cenário base), posteriormente otimizado com foco no nexo alimento-resíduo-energia, a partir de informações do contexto do Brasil.

O sistema de produto considerado é do berço ao túmulo, abrangendo desde a extração da matéria prima até estratégias de fim de vida dos resíduos. A função é proporcionar um ambiente para formação superior de estudantes. A unidade funcional (UF) e o fluxo de referência são 2 horas aula/semana para 60 alunos, considerando o método presencial. A unidade “hora/aula” constitui uma métrica comparável, representando uma sessão típica de ensino presencial e adotada em estudos anteriores (GIUSTI et al., 2024; GIUSTI et al., 2023).

No contexto das universidades chinesas, segundo nota do Ministério da Educação (2023), as aulas são compostas por duas aulas de 45 minutos com um intervalo de 10 minutos entre elas. Foi necessário então manter o período de 2 horas para atender ao padrão brasileiro, e assim permitir comparação com o sistema de produto da China, pensando na modelagem de cenários alternativos (ver Seção 2.4) para a ACV.

O sistema de produto abrangeu quatro processos primários: fornecimento de água, alimentação, eletricidade e combustível. Os *outputs* incluem as emissões devidas à gestão dos resíduos sólidos em aterros sanitários; as emissões devido aos resíduos alimentares; emissões de combustíveis fósseis; bem como os fluxos do tratamento de esgoto e resíduos sólidos urbanos por UF.

Em relação aos fluxos tecnológicos, as bases de dados utilizadas não contemplam dados da eletricidade da China, por isso utilizou-se o *input* referente à matriz energética da Polônia, que mais se assemelha ao cenário base, segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2021). No fluxo alimentar foi considerado o menu relatado no estudo de Fernandes e Calabria (2021), que inclui: fontes de carboidratos como arroz e macarrão; mix de vegetais; fontes de proteínas animais como a carne de porco, frango, bovina, peixe e camarão; fontes de proteínas vegetais como o tofu. Os dados do inventário foram extraídos de Wang et al. (2023) e adaptados à UF para o menu citado.

## 2.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Para a Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida (AICV) foi adotado o método *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*. As categorias de impacto avaliadas foram analisadas em estudos prévios (GIUSTI et al., 2024; SILVA et al., 2021). São elas: formação de partículas finas (em kg PM<sub>2.5</sub> eq); escassez de recursos fósseis (em kg oil eq); ecotoxicidade da água doce (em kg 1,4-DCB eq); eutrofização da água doce (em kg P eq); aquecimento global (kg CO<sub>2</sub>eq); toxicidade carcinogênica humana (em kg 1,4-DCB eq); toxicidade não cancerígena humana (em kg 1,4-DCB eq); radiação ionizante (em kBqCo-60 eq); uso da terra (em m<sup>2</sup>a crop eq); ecotoxicidade marinha (em kg 1,4-DCB eq); eutrofização marinha (em kg N eq); escassez de recursos minerais (em kg Cu eq); formação de ozônio, saúde humana (em kg NO<sub>x</sub> eq); formação de ozônio, ecossistemas terrestres (em kg NO<sub>x</sub> eq); depleção do ozônio estratosférico (em kg CFC11 eq); acidificação terrestre (em kg SO<sub>2</sub> eq); ecotoxicidade terrestre (em kg 1,4-DCB); consumo de água (em m<sup>3</sup>).

## 2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi realizada uma análise propondo quatro cenários alternativos com foco no nexo alimento-resíduo-energia: C1) alteração do destino dos resíduos, substituindo aterro por incineração com recuperação energética; C2) alteração da alimentação substituindo pelo cardápio de Giusti et al. (2023) para o Brasil; C3) alteração da matriz elétrica com uso de fontes renováveis a partir do contexto do Brasil; C4) combinação de todas as alterações anteriores como cenário otimizado.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 IMPACTOS AMBIENTAIS POTENCIAIS

Para possibilitar a comparação adequada entre as categorias, realizou-se a normalização dos resultados da ACV utilizando o reescalonamento pelo valor mínimo e máximo (OLIVEIRA et al., 2024), transformando em uma escala entre 0 e 1 os resultados, por meio da equação:  $x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ , onde  $x'$  é o valor normalizado,  $x$  corresponde ao valor original da variável,  $x_{\min}$  e  $x_{\max}$  representam os valores mínimos e máximos da variável  $x$ .

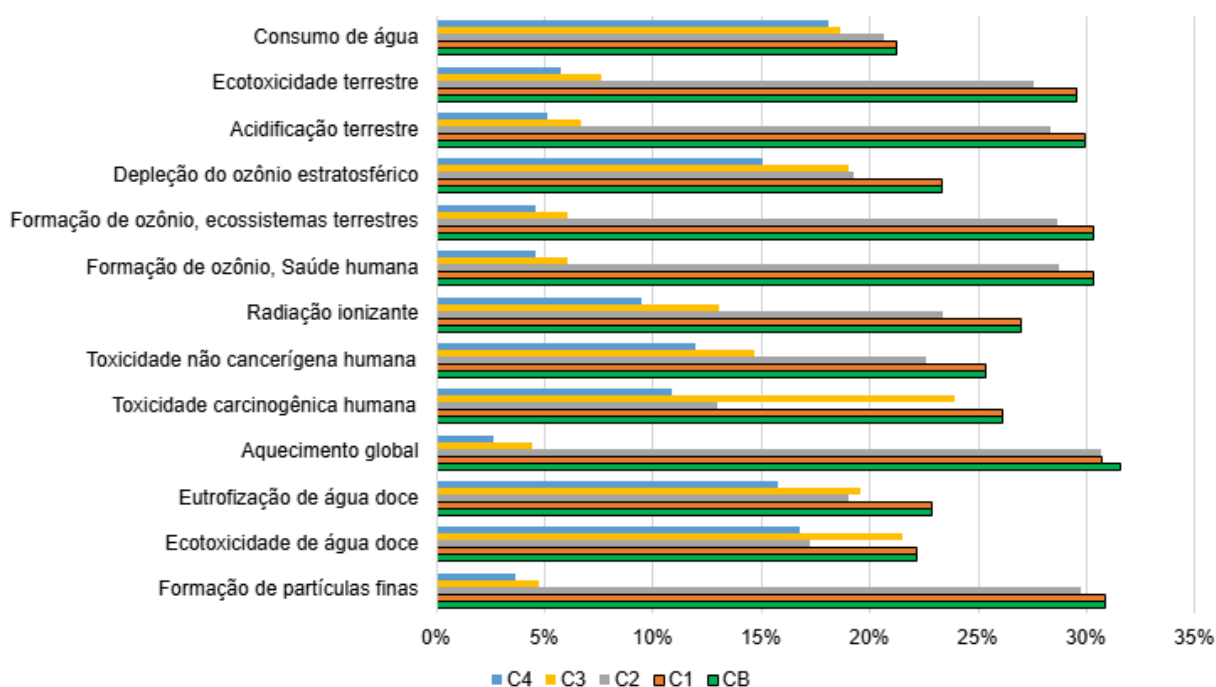
Entre as 18 categorias de impacto ambiental analisadas, 7 tiveram contribuições significativas e foram consideradas seus *hotspots*. Elas estão associadas ao aquecimento global (1,00), ecotoxicidade terrestre (0,56), escassez de recursos fósseis (0,19), toxicidade não cancerígena humana (0,15), uso da terra (0,09), radiação ionizante (0,04) e consumo de água (0,01). A análise de contribuição revelou que o processo relacionado ao fornecimento de eletricidade foi o principal responsável pelos impactos, seguido pela alimentação.

A categoria relacionada ao aquecimento global destaca-se devido à forte dependência da China por fontes fósseis, especialmente o carvão mineral, para geração de energia elétrica, bem como a lenta penetração de energias renováveis, como aponta Jiang et al. (2022). Essa matriz elétrica intensiva em carbono resulta em elevadas emissões de CO<sub>2</sub> e outros GEE. Essa constatação corroborada por Wang et al. (2023), ressalta a necessidade de estratégias para a neutralidade de carbono nos campi universitários.

### 3.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foi realizada análise de sensibilidade, que comparou o cenário de referência com os cenários alternativos C1, C2, C3 e C4. A Figura 1 ilustra de forma comparativa a contribuição relativa de cada cenário nas categorias de análise.

Figura 1 - Resultados comparativos da contribuição relativa de cada cenário por categoria de impacto



Fonte: autores.

Observa-se que, em comparação ao cenário base, apenas a categoria de aquecimento global apresentou redução de impactos no C1, correspondente a 3,03%. Portanto, ao alterar a estratégia de fim de vida e utilizar um novo *output* de incineração, há uma mitigação dos impactos ambientais, ainda que de forma limitada, que pode ser atribuída à diminuição da produção de metano nos aterros.

Na comparação entre o cenário base e o C2, verificou-se uma redução nos impactos ambientais em todas as 18 categorias analisadas. Com base no Princípio de Pareto, destacaram-se como mais expressivas as variações nas categorias de toxicidade carcinogênica humana (-50,19%), ecotoxicidade de água doce (-21,77%), ecotoxicidade marinha (-20,45%), uso da terra (-17,95%), depleção do ozônio estratosférico (-17,31%), eutrofização de água doce (-16,75%), eutrofização marinha (-13,96%), escassez de recursos minerais (-13,55%) e radiação ionizante (-13,21%).

Dessa forma, a alteração na modelagem, com a adoção de um menu básico de alimentação baseado nos dados do estudo de Giusti et al. (2023), realizado em uma universidade brasileira, evidenciou o potencial que alterações nos padrões alimentares podem ter na redução significativa dos impactos ambientais. Tal mudança demonstrou contribuir para a promoção da saúde humana e a preservação dos ecossistemas aquáticos, principalmente.

Esse resultado pode estar relacionado às particularidades das bases alimentares dos dois países (China e Brasil), especialmente no que se refere a composição das fontes proteicas. Enquanto o consumo de pescado no contexto brasileiro é relativamente baixo e regionalmente concentrado (WAGNER; COELHO; TRAVASSOS, 2023), na China ele é elevado e difundido, sendo uma importante fonte de proteína animal (FOGAÇA, 2020). Essa disparidade é capaz de impactar categorias como ecotoxicidade e eutrofização marinha. Além disso, as diferenças nas tecnologias de produção agrícola, na matriz energética e na cadeia logística de abastecimento alimentar podem ter influenciado os resultados observados na comparação entre os dois cenários alimentares, evidenciando a integração entre os fluxos de alimento e energia.

Igualmente, em comparação ao cenário base, todas as categorias apresentaram variações no C3. Aplicando o Princípio de Pareto, aquelas que demonstraram maior redução do impacto ambiental foram: escassez de recursos fósseis (-93,62%), aquecimento global (-85,96%), formação de partículas finas (-84,46%), formação de ozônio, saúde humana (-79,93%), formação de ozônio, ecossistemas terrestres (-79,82%), acidificação terrestre (-77,75%), ecotoxicidade terrestre (-74,17%) e radiação ionizante (-51,50%).

A hipótese para esse resultado relaciona-se à significativa redução da queima de carvão mineral na geração de energia. A saber, iniciativas que promovem a eficiência energética demonstraram seu potencial de contribuição na minimização dos impactos ambientais (GIUSTI et al., 2024). Assim, a diminuição da dependência do carvão, como discutido por Jia e Lin (2021), e a transição para uma matriz elétrica mais limpa como a utilizada no Brasil, contribui para a redução das emissões atmosféricas de poluentes e GEE e gera um menor impacto sobre a biodiversidade e uso da terra, ainda que nenhuma forma de geração de energia seja completamente isenta de consequências ambientais (BALESTIERI, 2020). Em contraste, embora a China também esteja desenvolvendo fontes de energia limpa, os combustíveis fósseis ainda desempenham um papel importante no desenvolvimento econômico do país e estima-se que eles continuarão a ser uma importante fonte de energia até 2050, como sugere Jiang et al. (2022).

Ao analisar o C4, destacaram-se as categorias escassez de recursos fósseis (-95,23%), aquecimento global (-91,54%), formação de partículas finas (-88,03%), formação de ozônio, saúde humana (-84,94%), formação de ozônio, ecossistemas terrestres (-84,85%), acidificação terrestre (-82,79%), ecotoxicidade terrestre (-80,59%), radiação ionizante (-64,71%), toxicidade carcinogênica humana (-58,29%), toxicidade não cancerígena humana (-53,01%) e

depleção do ozônio estratosférico (-35,37%). O desempenho do C4 sugere que ações articuladas em frentes como energia, alimentação e gestão de resíduos resultam em sinergias positivas. Isso reforça a abordagem integrada da sustentabilidade, como também recomendado por Jiang et al. (2022), que destacam a importância de estratégias conjuntas de redução de emissões e aumento de sequestro de carbono para a neutralidade climática.

Em suma, os resultados evidenciam onexo sistêmico entre alimentação, resíduos e energia no contexto da sustentabilidade universitária. A mudança nos padrões alimentares (C2) reduz impactos ambientais e a geração de resíduos orgânicos, que, quando bem geridos (C1), podem ser convertidos em energia renovável. A adoção de uma matriz energética mais limpa (C3 e C4) potencializa esses benefícios ao diminuir emissões e impactos associados à produção e transporte de alimentos e resíduos. Assim, esse ciclo virtuoso reforça a necessidade de políticas integradas nas áreas de alimentação, gestão de resíduos e energia, em consonância com os ODS (WANG et al., 2023; JIA; LIN, 2021; JIANG et al., 2022).

#### 4 CONCLUSÃO

Foram propostos quatro cenários alternativos para avaliar estratégias de mitigação ambiental no contexto universitário, com base na ACV. O cenário C1, que alterou a estratégia de fim de vida por meio da substituição de aterro por incineração com recuperação energética, resultou em uma redução limitada dos impactos, afetando de forma relevante apenas a categoria de aquecimento global. O C2, baseado na substituição dos *inputs* alimentares por um cardápio de referência do Brasil, apresentou reduções em todas as 18 categorias de impacto analisadas, com destaque para a diminuição da toxicidade carcinogênica humana e das ecotoxicidades aquática e marinhas. O C3, caracterizado pela substituição da matriz elétrica de origem fóssil por fontes renováveis, apresentou bom desempenho, especialmente nas categorias escassez de recursos fósseis, aquecimento global e formação de partículas finas. Já o C4, ao integrar as três estratégias modeladas anteriormente, apresentou uma abordagem holística de mitigação, destacando-se como alternativa para um melhor desempenho global a partir donexo alimento-resíduo-energia.

Os resultados indicam que intervenções estruturais na matriz elétrica são particularmente eficazes para o contexto da universidade chinesa analisada, sobretudo quando articuladas com mudanças nos padrões alimentares e estratégias de gestão de resíduos. Nesse sentido, o nexo alimento-resíduo-energia configura-se como um eixo conceitual estratégico para orientar políticas sustentáveis, evidenciando que ações sistêmicas e integradas geram benefícios ambientais mais amplos do que medidas isoladas. Tal abordagem é especialmente relevante em países com alta intensidade de emissões de GEE, como a China, onde estratégias articuladas e de longo prazo, alinhadas aos ODS, mostram-se essenciais para a transição rumo à neutralidade climática.

As limitações referem-se à indisponibilidade de bases de dados regionalizadas que representem as especificidades locais dos processos e fluxos analisados. Para investigações futuras, recomenda-se a adoção da Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV), com dados primários regionais, bem como a replicação em IES de diferentes contextos geográficos, a fim de ampliar a comparabilidade e a robustez dos resultados.

#### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 14044: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 14040: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – Requisitos e estrutura*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a

BALESTIERI, J. A. P. A geração de energia no contexto da sustentabilidade. In: VILANOVA, M. R. N., and SHIINO, M. Y., eds. *Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares* [online]. São Paulo: Editora UNESP, 2020, pp. 11-34.

CHINA. Ministério da Educação. *Tempo padrão de uma aula de graduação*. [S.l.]: Ministério da Educação da China, [2023]. Disponível em: <https://wenku.baidu.com/view/68b900fdf76527d3240c844769eae009581ba28c.html>. Acesso em: 16 jun. 2025.

FERNANDES, G. A.; CALABRIA, E. R. Práticas de comensalidade de jovens universitários chineses: um relato de experiência nas cantinas da Universidade Jiao Tong de Xangai. *Revista Mangút: Conexões Gastronômicas*, Rio de Janeiro, 2021.

FOGAÇA, F. O protagonismo do Brasil na produção mundial de pescado. *Embrapa*, 29 jun. 20. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53738345/artigo---o-protagonismo-do-brasil-na-producao-mundial-de-pescado>. Acesso em: 20 jun. 2025.

GIUSTI, G. et al. A multicriteria approach for consumption footprint in higher education institutions before and during the COVID-19 pandemic. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2023.

GIUSTI, G. et al. Linking the UN sustainable development goals to life cycle impact applied to a university campus. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, v.26, n.5, pp. 1051-1071, 2024.

GUINÉE, J. B. (Ed.). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

JIA, Z.; LIN, B. How to achieve the first step of the carbon-neutrality 2060 target in China: the coal substitution perspective. *Energy*, v.233, 2021.

JIANG, S. et al. A state-of-the-art review of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery as a promising technology to achieve carbon neutrality in China. *Environmental Research*, v.210, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *An energy sector roadmap to carbon neutrality in China*. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>. Acesso em: 16 jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>. Acesso em: 16 de jun. 2025.

OLIVEIRA, J. A. DE et al. (org.). *Engenharia e gestão do ciclo de vida de produtos: teoria e prática: a jornada de um produto do design circular à melhoria do desempenho em sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2024. 411 p.

SILVA, D. A. L. et al. The environmental impacts of face-to-face and remote university classes during the COVID-19 pandemic. *Sustainable Production and Consumption*, v. 27, p. 1975-1988, 2021.

WAGNER, Y. G., COELHO, A. B., TRAVASSOS, G. F. Análise do consumo domiciliar de pescados no Brasil utilizando dados da POF 2017-2018. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 61, n.3, 2023.

WANG, C. et al. The status and improvement opportunities towards carbon neutrality of a university campus in China: A case study on energy transition and innovation perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 414, 2023.