

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA, CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**

LIDIANE PATRÍCIA GONÇALVES

Método de alocação para a Avaliação do Ciclo de Vida de coprodutos de celulose

Relatório de Pesquisa de Pós-doutorado
apresentado à Faculdade de Engenharia,
Campus de São João da Boa Vista (UNESP)
para conclusão de pós-doutorado.

Supervisor: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

São João da Boa Vista

2025

Resumo

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é a principal técnica para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto. Para a aplicação da ACV existe a possibilidade de aplicar-se a alocação. Este procedimento torna a aplicação da ACV mais complexa, mas em alguns casos, como por exemplo na produção de multiprodutos e coprodutos, como é o caso da celulose, a alocação se torna necessária. Há escassez de trabalhos na literatura científica sobre este procedimento na indústria de celulose. Por isso, este trabalho tem como objetivo criar um método de alocação de impactos ambientais para multiprodutos de celulose. Para tal finalidade, foi estudado o sistema de produto que contém a produção da madeira, a extração da celulose e a fabricação do papel de dois produtos de uma empresa deste setor econômico.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; celulose; alocação; economia circular.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	4
1.1. Alocação de impactos ambientais em ACV	4
1.2. Problemas para a Alocação de impactos ambientais em produtos de celulose	6
1.3. Práticas do setor de celulose visando a Economia Circular	7
1.4. Desafios para Alocação de Impactos para produtos de Celulose	8
2. CONSIDERAÇÕES FINAIS	9
REFERÊNCIAS	10

1. INTRODUÇÃO

1.1. Alocação de impactos ambientais em ACV

O presente estudo foi conduzido com base em um acordo formal de cooperação técnica e confidencialidade firmado entre a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Engenharia, Campus de São João da Boa Vista (FESJ) e uma empresa do setor de celulose e papel, doravante denominada Empresa X. Esse acordo estabelece diretrizes para o compartilhamento, uso e proteção de informações industriais, garantindo a integridade ética e legal das atividades de pesquisa. Em virtude desse compromisso, a identificação da Empresa X, bem como de unidades produtivas específicas, dados operacionais e resultados sensíveis de desempenho ambiental e tecnológico, foi preservada em todas as etapas do trabalho. Assim, o relatório adota uma abordagem descritiva e metodológica que mantém o rigor científico e a rastreabilidade das análises, sem, contudo, expor informações de natureza estratégica ou confidencial.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de Engenharia e Gestão do Ciclo de Vida (EGCV), que tem como objetivo principal avaliar quantitativamente e qualitativamente os impactos ambientais do ciclo de vida do produto, conforme ISO 14040 (2006). Em sistemas multifuncionais, a geração de coprodutos demanda métodos específicos de alocação das cargas ambientais (Oliveira, *et al.*, 2021).

A alocação é um dos desafios metodológicos centrais da ACV, sendo necessária quando um processo ou sistema produtivo gera múltiplos produtos, subprodutos ou funções.

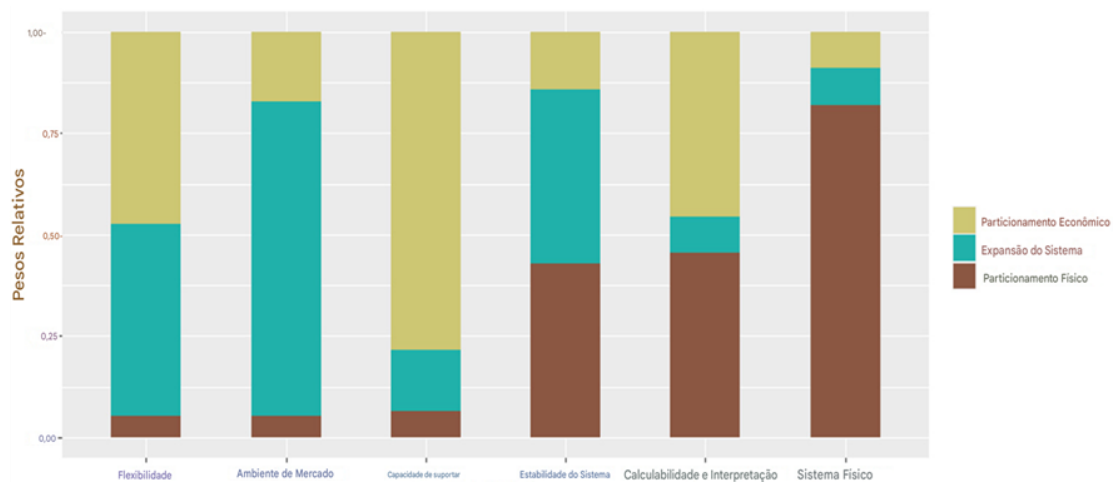
A ISO 14040 (2006) estabelece uma hierarquia para tratar situações de multifuncionalidade, com o objetivo de garantir consistência metodológica e transparência nos estudos.

A primeira abordagem recomendada pela ISO 14040 (2006) é evitar a alocação, por meio da divisão do processo (*process subdivision*) ou da expansão dos limites do sistema (*system expansion*), integrando os processos adicionais necessários para representar todas as funções dos coprodutos. Guinee et al. (2011) criticam a complexidade da expansão de sistema, enquanto Weidema (2000) a defende.

Caso a alocação seja necessária, a seleção dos critérios é de fundamental importância para a significância dos resultados, como por exemplo, massa ou energia (ISO 14044, 2006). Se tais critérios não forem apropriados ou disponíveis, permite-se a aplicação de critérios econômicos, como a participação relativa no valor de mercado dos produtos.

Wenger *et al.* (2022), compararam a prática de expansão do sistema com duas alternativas de alocação (particionamentos físico e econômico) em relação aos pares quanto aos subcritérios sistema físico, capacidade de suporte, ambiente de mercado, estabilidade do sistema, viabilidade de cálculos, interpretação e flexibilidade. Esta comparação é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Alternativas e pesos de subcritérios para alocação



Adaptado de Wenger *et al.* (2022).

O guia ILCD (2010), elaborado pela Comissão Europeia, reforça a análise apresentada na Figura 1, mas fornece orientações mais detalhadas e práticas para cada etapa. Ele destaca que a escolha do critério de alocação deve considerar a representatividade física dos fluxos e sua relevância ambiental, além de exigir documentação clara e justificativa para a opção adotada. O guia também salienta que a alocação econômica deve ser usada com cautela, especialmente em mercados instáveis ou quando os preços dos coprodutos não refletem proporcionalmente seu papel ambiental ou físico no processo. A fragilidade de alocação por critérios econômicos já foi relatada por publicações antigas, como exemplos, Frischknecht (2000) diferencia coprodutos (alto valor econômico) de subprodutos (baixo valor econômico), impactando a estratégia de

alocação. Guinee et al. (2011) determinam subproduto como aquele cujo aumento de demanda não altera significativamente o volume de produção.

1.2. Problemas para a Alocação de impactos ambientais em produtos de celulose

A complexidade sobre a Alocação em ACV tem sido relatada há anos. Há importantes publicações da literatura científica que têm apontado a importância da transparência e da análise de sensibilidade quando se aplica alocação. Estratégias híbridas, que combinam diferentes métodos ou testam múltiplos critérios, têm sido recomendadas para lidar com incertezas e melhor compreender os impactos associados a cada escolha. A alocação na ACV de processos complexos, como os de reciclagem, coprocessamento de resíduos ou produção e introdução de produtos em novos ciclos de vida, pois os critérios adotados podem alterar significativamente os resultados e as conclusões dos estudos (Mutel *et al.*, 2013; Malabi *et al.*, 2020, Aromaa *et al.*, 2022; Aldama *et al.*, 2023). Por fim, é importante destacar que a decisão sobre como tratar a alocação deve estar alinhada aos objetivos do estudo, ao público-alvo e à função do sistema analisado. A clareza metodológica contribui para a credibilidade dos resultados e para a comparabilidade entre diferentes avaliações.

A Alocação de impactos ambientais em sistemas de coprodução é um dos pontos mais críticos e controversos da ACV. De forma geral, a partir do estudo realizado, os principais problemas identificados para esta prática são:

- **Ambiguidade e subjetividade:** a flexibilidade das normas ISO permite diferentes interpretações e métodos de alocação, levando a resultados inconsistentes e pouco comparáveis. A escolha do método muitas vezes depende do julgamento do profissional, o que introduz um viés nos resultados.
- **Falta de orientação para cenários Complexos:** as diretrizes atuais são insuficientes para sistemas complexos como biorrefinarias e modelos de economia circular. A valorização de resíduos e a captura de carbono, por exemplo, não são adequadamente abordadas pelas metodologias tradicionais.
- **Desconexão entre desempenho ambiental e Econômica:** a alocação de impactos raramente é discutida de forma integrada, considerando tanto os aspectos

ambientais quanto os econômicos. Essa desconexão pode levar a decisões que são ambientalmente corretas, mas economicamente inviáveis, ou vice-versa.

- Impacto na tomada de decisão estratégica: A falta de clareza sobre como a alocação afeta o desempenho ambiental calculado de uma empresa impede o uso eficaz da ACV como ferramenta estratégica para a sustentabilidade.

Superar estes problemas exige o desenvolvimento de metodologias de alocação mais robustas, transparentes e padronizadas, que integrem as dimensões ambiental e econômica e forneçam uma base sólida para a tomada de decisão.

1.3. Práticas do setor de celulose visando a Economia Circular

As empresas do ramo de celulose, de forma geral, atuam em diversas frentes para a produção de celulose e papel, bem como na busca por maior sustentabilidade e inovação. As práticas comuns observadas no setor incluem:

- Produção de celulose e papel: o core business dessas empresas é a produção de celulose branqueada a partir de florestas cultivadas, como o eucalipto, e a fabricação de papel para diversas aplicações. Elas estão entre as maiores produtoras mundiais, atendendo a mercados globais.

- Desenvolvimento de biorrefinarias e lignina: há crescente investimento no desenvolvimento de biorrefinarias integradas às unidades fabris. A lignina, um subproduto da produção de celulose, é uma aposta estratégica, sendo utilizada na cogeração de energia e na produção de insumos químicos que podem substituir derivados de petróleo. Algumas empresas já operam plantas piloto e planejam unidades em escala industrial para explorar o potencial da lignina.

- Sustentabilidade ambiental: o setor busca ativamente reduzir o uso de combustíveis fósseis, com metas de eliminação gradual. Parcerias com outras empresas são estabelecidas para transformar resíduos sólidos em novos produtos, promovendo a economia circular. Estudos demonstram que o cultivo de eucalipto contribui significativamente para o sequestro de carbono, mitigando as mudanças climáticas. A estratégia dessas empresas é baseada na oferta de produtos e serviços rentáveis a partir de florestas renováveis.

- Pesquisa e desenvolvimento (P&D): há investimento contínuo em P&D, com foco em biotecnologia, genética, melhoramento florestal e processos industriais. As empresas buscam parcerias estratégicas com fornecedores de tecnologia, universidades e indústrias químicas para desenvolver novos negócios e inovações.
- Inovação em tecnologias integradas: a inovação é combinada com a sustentabilidade para encontrar soluções para desafios sociais e ambientais. A base da estratégia é o desenvolvimento de produtos renováveis a partir da biomassa florestal, com foco na bioeconomia e na inovação em todas as etapas do processo, desde o desenvolvimento de mudas até a entrega de produtos.
- Novos produtos e bioeconomia: o setor está desenvolvendo novos produtos a partir da biomassa florestal, como substitutos de produtos de origem fóssil, e investindo em tecnologia sustentável para novos mercados, com foco em componentes que podem ganhar escala e contribuir para a bioeconomia.

1.4. Desafios para Alocação de Impactos para produtos de Celulose

A alocação de impactos ambientais para produtos de celulose apresenta desafios específicos, dada a complexidade da cadeia de valor da indústria florestal e de papel, que frequentemente envolve a produção de múltiplos produtos (coprodutos) a partir de uma mesma matéria-prima e processo. Os principais desafios incluem:

- Complexidade dos sistemas de coprodução: a indústria de celulose é caracterizada por processos que geram múltiplos produtos, como celulose, lignina, energia (vapor e eletricidade) e outros subprodutos derivados dos resíduos.
- Definição da unidade funcional e limites do sistema: a complexidade da cadeia de suprimentos, que envolve desde o manejo florestal até a produção industrial e o descarte, exige uma delimitação clara. A inclusão de todos os fluxos de entrada e saída, incluindo o uso da terra, água, produtos químicos e energia, e a atribuição desses impactos aos produtos, é um desafio metodológico.
- Representatividade dos dados e escala: as limitações dos dados em escala de laboratório podem superestimar o consumo de energia e distorcer os resultados de impacto ambiental quando extrapolados para a escala industrial.

- Tratamento de carbono biogênico e sequestro de carbono: a indústria de celulose e papel, baseada em recursos renováveis, tem um papel importante no ciclo do carbono. A alocação e o tratamento do carbono biogênico (absorvido e liberado durante o ciclo de vida da biomassa) e do sequestro de carbono em florestas plantadas são desafios metodológicos. Os métodos de tratamento de captura de carbono e valorização de resíduos variam significativamente entre os setores, levando a inconsistências.
- Coprodução de resíduos industriais: Os resíduos que são resultantes do processo de fabricação em indústria de celulose podem ser comercializados como fertilizantes, tijolos, argamassa entre outros.
- Integração de aspectos socioeconômicos: variabilidade de dados e falta de regionalização dos indicadores são desafios também para este setor.

Em resumo, os desafios na alocação de impactos para produtos de celulose são intrínsecos à natureza complexa da indústria, à necessidade de dados representativos e à evolução das metodologias de ACV para incorporar aspectos como a economia circular e o sequestro de carbono. Superar esses desafios exigirá um esforço colaborativo entre pesquisadores, indústria e formuladores de políticas para desenvolver diretrizes mais claras e ferramentas mais robustas.

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alocação de impactos ambientais ACV de coprodutos da indústria de celulose configura-se como um dos aspectos metodológicos mais desafiadores e determinantes para a qualidade dos resultados obtidos. A complexidade dos sistemas de coprodução, a diversidade dos fluxos materiais e energéticos e a necessidade de integração de diferentes critérios (físicos, econômicos e ambientais) demandam abordagens rigorosas, transparentes e tecnicamente justificadas.

Este estudo discute e assim, contribui para o avanço das práticas de alocação ao propor um método específico para a realidade produtiva da celulose, considerando não apenas a massa e a energia dos fluxos, mas também os limites de aplicabilidade das abordagens econômicas, conforme apontado na literatura técnica. As análises evidenciaram que a escolha dos critérios de alocação influencia de forma significativa os

resultados das categorias de impacto ambiental, afetando a interpretação dos dados e a possibilidade de comparação entre diferentes sistemas produtivos.

Os desafios observados, como a dificuldade de tratar adequadamente o carbono biogênico, a limitação de dados regionais e a falta de metodologias consolidadas para cenários complexos de economia circular, reforçam a necessidade de aprimoramento contínuo das práticas de ACV no setor. A ausência de padronização nacional e a escassez de inventários locais dificultam a geração de estudos robustos e comparáveis no contexto brasileiro, limitando a capacidade de avaliação específica para as condições regionais da produção de celulose.

Os resultados deste estudo estão sendo consolidados com vistas à elaboração de manuscritos científicos a serem submetidos a periódicos e conferências científicas. O método proposto neste trabalho fornece apontamentos para o desenvolvimento metodológico da Alocação em estudos de ACV no setor de celulose, com potencial de contribuir para decisões mais alinhadas à sustentabilidade. Ainda assim, recomenda-se que futuras pesquisas ampliem a discussão sobre o tratamento de resíduos, a valorização de subprodutos e a contabilização dos fluxos de carbono de forma mais integrada e regionalizada, visando a evolução metodológica e a maior representatividade dos resultados para a realidade da indústria brasileira.

REFERÊNCIAS

- ALDAMA, D. D.; GRASSAUER, F.; ZHU, Y.; ARDESTANI-JAAFARI, A.; PELLETIER, N. Allocation methods in life cycle assessments (LCA) of agri-food co-products and food waste valorization systems: Systematic review and recommendations. **Journal of Cleaner Production**, v. 421, p. 138488, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138488>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262302646X>. Acesso em: 10 maio 2026.
- AROMAA, R.; RINNE, M.; Comparative Life Cycle Assessment of Hardmetal Chemical Recycling Routes. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 10, n. 31, p. 10234–10242, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01969>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.2c01969>. Acesso em: 10 maio 2026.
- BRAZ, Danilo Silva. **Produção de combustível de aviação em biorrefinarias anexas a fábricas kraft de celulose de eucalipto**: avaliação técnico-econômica, de ciclo de vida e tomada de decisão por múltiplos critérios. 2018. Dissertação (mestrado) -

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2026.

BOURA, A.; KORONEOS, C. J.; MOUSSIOPOULOS, N. Overview of LCA activities in Greece from LHTEE. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, p. 203–204, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02979359>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02979359>. Acesso em: 10 maio 2026.

CARVALLO, A.; VEGA-COLOMA, M. Environmental life cycle assessment of bleached pulp from eucalyptus: Chilean case. **Sustainability**, v. 16, n. 21, p. 9236, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16219236>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/21/9236>. Acesso em: 10 maio 2026.

EUROPEAN COMMISSION – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance**. 1.0 ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

FILHO, E. B. DE S.; ROSA, M. DE F.; SILVA NETO, R. M. DA; SANTA BRÍGIDA, A. I. Allocation methods in LCA of agri-food co-products and waste: systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 421, p. 138488, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138488>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262302646X?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2026.

FRISCHKNECHT, R.; A. BRAUNSCHWEIG, P. HOFSTETTER, P. SUTER, Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 20, n. 2, p. 159–189, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925599000426?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2026.

GONÇALVES, C. DE F.; CORREA, S. R. S.; RODRIGUES, L. B.; ALMEIDA NETO, J. A. Pegada de carbono do ciclo de vida da celulose de eucalipto: estudo de caso numa empresa baiana. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 4, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n4.31816>. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/>. Acesso em: 10 maio 2026.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, v. 45, p. 90–96, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es101316v>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101316v>. Acesso em: 10 maio 2026.

HERMANSSON, F.; JANSSEN, M.; SVANSTRÖM, M. Allocation in life cycle assessment of lignin. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 8, p. 1620–1632, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01770-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01770-4>. Acesso em: 10 maio 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:2006**: environmental management – life cycle assessment – principles and framework. Geneva, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:2006**: environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. Geneva, 2006.

LI, QINGQING; MCGINNIS, SEAN; SYDNOR, CUTTER; WONG, ANTHONY; RENNECKAR, SCOTT. Nanocellulose life cycle assessment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 1, n. 8, p. 919–928, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/sc4000225>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/sc4000225>. Acesso em: 10 maio 2026.

MALABI EBERHARDT, L.C.; VAN STIJN, A.; NYGAARD RASMUSSEN, F.; BIRKVED, M.; BIRGISDOTTIR, H. Development of a Life Cycle Assessment Allocation Approach for Circular Economy in the Built Environment. **Sustainability**, v. 12, p. 9579, 2020 DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229579>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9579>. Acesso em: 10 maio 2026.

MUTEL, C., BAAN, L.; HELLWEG, S. Two-Step Sensitivity Testing of Parametrized and Regionalized Life Cycle Assessments: Methodology and Case study. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 11, p. 5660–5667, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/es3050949>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es3050949>. Acesso em: 10 maio 2026.

OLIVEIRA, J. A.; SILVA, D. A. L. ; PUGLIERI, F. N. ; SAAVEDRA, Y. M. B. **Life Cycle Engineering and Management of Products**: Theory and Practice, Springer Cham, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78044-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-78044-9>. Acesso em: 10 maio 2026.

SILVA, R. DE A. **Avaliação do ciclo de vida da produção de celulose bacteriana em diferentes meios de cultivo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2019.

WEIDEMA, B. P. **Comparison of the Requirements of the GHG Protocol Product Life Cycle Standard and the ISO 14040 Series**. 2.0 LCA Consultants, Aalborg, Denmark. 2022.

WENGER, J.; PICHLER, S.; NÄYHÄ, A.; STERN, T. Practitioners’ perceptions of co-product allocation methods in biorefinery development - A case study of the Austrian pulp and paper industry. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2619, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052619>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2619>. Acesso em: 10 maio 2026.