

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial

ÓLIVER SILVA COSTA BARRETO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL DA
SURFACTINA OBTIDA A PARTIR DA *BACILLUS SUBTILIS***

Salvador
2023

ÓLIVER SILVA COSTA BARRETO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL DA
SURFACTINA OBTIDA A PARTIR DA *BACILLUS SUBTILIS***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito para a obtenção do título de Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof^a. Dr^a Edna dos Santos Almeida
Coorientador: Prof. Dr. Diego Lima Medeiros.

Salvador
2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

B273a Barreto, Óliver Silva Costa

Avaliação do ciclo de vida ambiental da surfactina obtida a partir da *Bacillus subtilis* / Óliver Silva Costa Barreto. – Salvador, 2023.

140 f. : il. color.

Orientadora: Prof.^a Dra. Edna dos Santos Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Diego Lima Medeiros.

Tese (Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Biossurfactantes. 2. Surfactina. 3. Avaliação de ciclo de vida (ACV). 4. OpenLCA. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Almeida, Edna dos Santos. III. Medeiros, Diego Lima. IV. Título.

CDD 574.192

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Doutorado em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Doutorado, intitulada "**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL DA SURFACTINA OBTIDA A PARTIR DA BACILLUS SUBTILIS**" apresentada no dia 29 de dezembro de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora:	<p>Assinado eletronicamente por: Edna dos Santos Almeida CPF: ***.903.998-** Data: 05/01/2024 10:49:32 -03:00</p> <p>Prof.^a Dr.^a Edna dos Santos Almeida SENAI CIMATEC</p>
Coorientador:	<p>Assinado eletronicamente por: Diego Lima Medeiros CPF: ***.524.915-** Data: 02/01/2024 20:12:53 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Diego Lima Medeiros UFMA</p>
Membro Interno:	<p>Assinado eletronicamente por: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa CPF: ***.470.565-** Data: 03/01/2024 07:34:25 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa SENAI CIMATEC</p>
Membro Interno:	<p>Assinado eletronicamente por: Aloisio Santos Nascimento Filho CPF: ***.459.665-** Data: 03/01/2024 07:38:31 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Aloisio Santos Nascimento Filho SENAI CIMATEC</p>
Membro Externo:	<p>Assinado eletronicamente por: Lucas Guimarães Cardoso CPF: ***.762.215-** Data: 08/01/2024 15:43:04 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Lucas Guimarães Cardoso UNIFACS</p>
Membro Externo:	<p>Assinado eletronicamente por: Henrique Leonardo Maranduba CPF: ***.825.515-** Data: 02/01/2024 21:43:26 -03:00</p> <p>Prof. Dr. Henrique Leonardo Maranduba FIT</p>

Para aprender a levantar, tropeços. Para grandes desafios, brio. Para uma longa trilha, o essencial. Quando as coisas se confundem, é necessário voltar ao começo. Nada como um dia após o outro dia. Nunca é sobre si. A verdadeira conquista é coletiva.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de viver tudo que já me foi proporcionado, 30 anos de abraço quente e proteção.

Nos últimos 11 anos tenho atravessado vales e montanhas, asfaltos e córregos, nunca foi fácil, mas nunca me faltou coragem, esforço e fé. Nessa travessia entre ambientes acadêmicos e industriais eu me encontrei. A luz da ciência me encanta. As corretas tomadas de decisão me seduzem.

Apesar da curiosidade e bons frutos, nunca foi fácil, forjei-me e me descobri no mundo frente às marés turbulentas e cada passo dado só foi possível pelo apoio dos que estiveram ao meu lado ao longo de toda a trajetória.

À ancestralidade, meus agradecimentos e orações.

Aos meus pais, que são terra fértil, transmito os meus mais sinceros sentimentos, grato pela formação de carácter e fé, coragem e união, honro o que eu aprendi e os levarei comigo por onde andar.

Aos meus irmãos, agradeço o apoio e companheirismo nesta vida.

Vó, gratidão por todas suas orações.

Estendo meus agradecimentos aos meus tios e toda a família que sempre torceu e me apoiou.

A tio Dinho pelo carinho e companheirismo.

Aos não consanguíneos, a amizade sempre foi a regra que me manteve forte para atravessar os verões.

A Manu e toda família Mota, minha eterna gratidão pelo amor e cuidado de sempre.

Destaco meu agradecimento a Edna, que, em sua nobre missão de orientadora, jamais me desamparou, esteve sempre ao meu lado nessa jornada, se alegrando nas conquistas e sofrendo com os tropeços. Muito obrigado por lutar e sempre acreditar que fosse possível.

A Diego, meu coorientador e navegador dos 7 mares, muito obrigado por todo conhecimento transmitido, pelas horas e horas de reuniões aos finais de semana e por toda a representatividade.

Agradeço ainda, a todos os membros das bancas pelo esforço à ciência e pelas sugestões de melhorias.

Findo esses agradecimentos, destacando o apoio e incentivo de toda comunidade acadêmica da UFRB. Muito obrigado a todos.

A FAPESB, pelo fomento da bolsa e ao SENAI CIMATEC pela possibilidade de realização do doutorado.

RESUMO

Os surfactantes são utilizados em diversos setores, abrangendo desde usos domésticos até aplicações industriais. Suas propriedades de redução de tensão superficial os tornam amplamente utilizados em saneantes, cosméticos, alimentos, agroquímicos, petróleo e fármacos. Os surfactantes sintéticos, amplamente utilizados devido à sua eficiência de limpeza e versatilidade, são predominantemente originados do petróleo. Em contrapartida, os biossurfactantes, exemplificados pela surfactina nesta tese, constituem uma variedade de tensoativos obtidos por microrganismos, incluindo leveduras, bactérias e fungos, a partir de fontes renováveis de biomassa. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho ambiental da surfactina, desde a extração das matérias-primas até o portão da fábrica em escala industrial, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) conforme as normas NBR ISO 14040 e 14044. Foram realizadas simulações com dados de diferentes fontes e escalas de produção, considerando as suas incertezas, devido à falta de dados primários em escala industrial. A produção de 1 kg de surfactina foi avaliada em sete cenários distintos, variando o meio fermentativo e a concentração de surfactina, considerando diferentes categorias ambientais. Os resultados obtidos indicam que os impactos dos cenários avaliados estão na mesma ordem de grandeza em comparação a estudos de biossurfactantes da literatura. As análises de contribuição destacaram que o consumo de utilidades (eletricidade, ar e vapor), a fonte de carbono utilizada como substrato e a produtividade da surfactina, que variou entre 6-26 % w/w, foram as variáveis mais relevantes para as categorias avaliadas. Cenários alternativos foram propostos utilizando fonte residual de carbono, conversão de 16 % w/w do substrato em surfactina e substituição do fornecedor da matriz elétrica. Esta proposta demonstrou resultados favoráveis, reduzindo em até 70 % a pegada de carbono em comparação com o cenário mais favorável dos sete cenários base. Avaliando o cenário Alternativo 5, que considera 16 % w/w e utilidades advindas de usinas fotovoltaicas com expansão da fronteira do sistema, que considera o impacto do tratamento de resíduo em comparação com o LAS, é possível destacar que de acordo com o tratamento de resíduo adotado, o impacto do potencial de aquecimento global da surfactina pode ser menor em relação à produção do LAS. Desta forma, evidencia-se que há caminhos viáveis para a mitigação dos impactos ambientais do ciclo de vida da produção da surfactina. Ademais, os avanços tecnológicos indicam a possibilidade de aumento da produtividade da produção de biossurfactantes, tornando-os mais sustentáveis e competitivos comercialmente em comparação aos surfactantes de fonte fóssil.

Palavras-chave: Biossurfactantes. Surfactina. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). OpenLCA.

ABSTRACT

Environmental life cycle assessment of surfactin derived from *Bacillus subtilis*.

Surfactants are employed in various sectors, ranging from domestic to industrial applications. Their surface tension reduction properties make them widely used in cleansers, cosmetics, food, agrochemicals, petroleum, and pharmaceuticals. Synthetic surfactants, extensively utilized for their cleaning efficiency and versatility, are predominantly derived from petroleum. In contrast, biosurfactants, exemplified by surfactin in this thesis, constitute a variety of surface-active agents obtained from microorganisms, including yeast, bacteria, and fungi, sourced from renewable biomass. This work aims to assess the environmental performance of surfactin, from raw material extraction to the factory gate on an industrial scale, using Life Cycle Assessment (LCA) according to ISO 14040 and 14044 standards. Simulations were conducted with data from different sources and production scales, considering uncertainties due to a lack of primary data on an industrial scale. The production of 1 kg of surfactin was evaluated in seven distinct scenarios, varying fermentative medium and surfactin concentration, considering different environmental categories. The results indicate that the impacts of the evaluated scenarios are of the same order of magnitude compared to biosurfactant studies in the literature. Contribution analyses highlighted that utility consumption (electricity, air, and steam), the carbon source used as a substrate, and surfactin productivity ranging from 6-26 % w/w were the most relevant variables for the assessed categories. Alternative scenarios were proposed using residual carbon sources, converting 16 % w/w of the substrate into surfactin, and changing the electricity matrix supplier. This proposal demonstrated favorable results, reducing global warming by up to 70 % compared to the most favorable scenario among the seven base scenarios. Evaluating Alternative Scenario 5, considering 16 % w/w and utilities from photovoltaic plants with an expanded system boundary that accounts for the impact of waste treatment compared to LAS, it is possible to highlight that, depending on the waste treatment adopted, the global warming impact of surfactin may be lower than LAS production. Thus, viable paths for mitigating the environmental impacts of surfactin production's life cycle are evident. Furthermore, technological advancements suggest the possibility of increasing biosurfactant production efficiency, making them more sustainable and commercially competitive compared to fossil-derived surfactants.

Keywords: Biosurfactants. Surfactin. Life Cycle Assessment (LCA). OpenLCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um surfactante em meio polar e apolar	25
Figura 2 - Estrutura química geral do Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS)	27
Figura 3 - Entradas e saídas da produção do Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS).	28
Figura 4 - Etapas na redução da tensão superficial em função da adição de biosurfactante até atingir a concentração micelar crítica (CMC) e formação de micelas	29
Figura 5 - Estrutura química dos lipopeptídeos surfactina(A), iturina (B) e fengicina (C)	33
Figura 6 - Estrutura química e composição de aminoácidos da Família Surfactina (SF).	35
Figura 7 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).	44
Figura 8 - Diagrama dos estágios do ciclo de vida	45
Figura 9 - Distinção entre os métodos midpoint e endpoint	47
Figura 10 - Fase de interpretação da ACV-	55
Figura 11 - Fluxo de atividades para a ACV da Surfactina.	69
Figura 12 - Sistema de produto da produção de surfactina.	71
Figura 13 - Insumos e utilidades da operação que compõem os inventários de primeiro plano dos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina em pó (89 %).	75
Figura 14 - Sistema de produto que representa a multifuncionalidade do cenário Alternativo 5 em comparação com o LAS.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores da Matriz Pedigree.	52
Tabela 2 - Fatores básicos de incerteza (sem dimensão): Incerteza Básica.	53
Tabela 3 - Dados experimentais de laboratório da produção de surfactina obtidos na literatura.	72
Tabela 4 - Comparação dos cenários Alternativos ao Cenário 1 (C1) de produção de 1 kg de surfactina nas categorias avaliadas.	95
Tabela 5 - Comparação do cenário Alternativo 5 com expansão de fronteira e linear alquilbenzeno sulfonato (LAS) para a produção de 1 kg de surfactante.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes, moléculas e produtos de surfactantes.	26
Quadro 2 - Principais classes e subclasses de biossurfactantes e suas fontes microbianas na literatura consultada.	31
Quadro 3 - Diferentes técnicas de purificação para biossurfactantes.	39
Quadro 4 - Características de experimentos da produção de surfactina.	41
Quadro 5 - Métodos de avaliação de impacto.	48
Quadro 6 - Categorias do método ReCiPe (2016) para avaliação de impacto do ciclo de vida.	50
Quadro 8 - Estudos de biossurfactantes que utilizaram a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Energia fóssil nos Cs avaliados de produção de 1 kg de surfactina	82
Gráfico 2 – Potencial de aquecimento global nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina	83
Gráfico 3 - Depleção da camada de ozônio nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina	84
Gráfico 4 - Consumo de água nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina	85
Gráfico 5 - Ecotoxicidade nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina	86
Gráfico 6 - Toxicidade humana nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina	88
Gráfico 7 - Comparação do consumo de energia fóssil dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante	90
Gráfico 8 - Comparação do potencial de aquecimento global dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante	91
Gráfico 9 - Comparação da depleção da camada de ozônio dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante	92
Gráfico 10 - Comparação do consumo de água dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante	93
Gráfico 11 - Comparação do potencial de aquecimento global dos cenários base (C1-C7) e cenários alternativos de produção de 1 kg de surfactina.	98

Gráfico 12 - Comparação de todas as categorias de impacto analisadas para os cenários base (C1-C7) e cenários alternativos de produção de 1 kg de surfactina.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	17
1.2	NOTAS SOBRE A REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	21
1.3	O DESEMPENHO AMBIENTAL	22
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Objetivo Geral	22
1.4.2	Objetivos Específicos	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	SURFACTANTES	24
2.1.1	Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS)	26
2.2	BIOSURFACTANTES	29
2.1	SURFACTINA	34
2.3	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV): FUNDAMENTOS	43
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV): SURFACTANTES	55
3	MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO	69
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO	70
3.3	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO	71
3.4	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)	74
3.5	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	76
3.6	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)	77
3.7	INTERPRETAÇÃO: ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO, INCERTEZA E SENSIBILIDADE	78

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV)	81
4.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)	81
4.3	ENERGIA FÓSSIL	81
4.3.1	Potencial de aquecimento global	82
4.3.2	Depleção da camada de ozônio	84
4.3.3	Consumo de água	85
4.3.4	Ecotoxicidade	86
4.3.5	Toxicidade humana	87
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE SURFACTANTES	89
4.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	94
4.5	OPORTUNIDADES E DESAFIOS	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	CONCLUSÃO	102
4.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A – Procedimentos de Pesquisa	122
	APÊNDICE B - Contribuições da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) por cadeia de fornecimento de insumos e utilidades.	129
	APÊNDICE C - Simulações de Monte Carlo	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os surfactantes são moléculas anfifílicas e sua utilização desempenha um papel fundamental em uma ampla gama de aplicações industriais e tecnológicas. Devido às suas propriedades de redução de tensão superficial e capacidade de formar micelas, são amplamente empregados em setores como cuidados pessoais, fármacos, pesticidas, alimentos e petróleo (AFOLABI *et al.*, 2022).

Eles são comumente categorizados em quatro agrupamentos gerais de surfactantes, baseados na polaridade do grupo principal das moléculas: aniônico, catiônico, não iônico e zwitteriônico, a seguir

Os surfactantes aniônicos carregam uma carga negativa e são os surfactantes mais comumente disponíveis entre os produzidos sintética e naturalmente (KURUP, 2023). Os surfactantes sintéticos, muito utilizados em diversas aplicações devido a sua eficácia e versatilidade, são predominantemente derivados do petróleo. A maioria dos tensoativos atualmente em uso são sintéticos. O baixo custo, alto volume de produção e constância de uso provocaram avanços de pesquisa e desenvolvimento desde o início do século XX, resultando na otimização desses tensoativos para uma ampla gama de usos nas indústrias (JOHNSON *et al.*, 2021).

A produção de surfactantes em 2023 foi de aproximadamente 17 milhões de toneladas ao ano e a maioria do volume produzido acabou sendo lançada como efluente. A projeção de crescimento do mercado global de surfactantes sintéticos, para os anos de 2021 a 2028, é de 4,9 %, passando de 41 bilhões de dólares em 2021 para US\$ 58 bilhões (NAGTODE *et al.*, 2023).

Diante desse volume, resolver questões ambientais é um assunto crucial para um setor que lida com a expansão de regulamentações ambientais, acordos mundiais e conscientização dos clientes. Surfactantes sintéticos geralmente exibem alta toxicidade e baixa biodegradabilidade, resultando em impactos ambientais como poluição de leitos aquáticos, redução da oxigenação de rios, funções antibacterianas prejudiciais ao equilíbrio do meio e toxicidade para organismos vivos. Além disso, referente ao uso humano, há possíveis danos devido ao potencial de toxicidade e irritação (MD *et al.*, 2019). No entanto, devido a constância de uso desses surfactantes em diferentes

contextos, seus impactos ambientais muitas vezes são negligenciados (JOHNSON *et al.*, 2021).

Desde a divulgação do relatório especial do IPCC “Aquecimento Global de 1,5°C” e ocorrência da Reunião das Partes (COP), vários países concordaram em tomar atitudes mais sustentáveis, garantindo que a temperatura média global não ultrapasse 2°C em comparação com níveis anteriores (NAIDOO, 2022). Esse movimento de interesse público e governamental leva à formalização de acordos, leis e regulamentos ambientais mais seguros. A contaminação dos ecossistemas tem sido progressivamente associada à sustentabilidade, mudanças climáticas e vários problemas de saúde, o que lança luz sobre para um movimento de regulação que compromete o mercado futuro de produtos à base de recursos fósseis (JIMOH; LIN, 2019).

Com o desenvolvimento de regularizações que implicam em maior tributação e falta de incentivo para uso de tecnologias não-renováveis, muitas empresas e núcleos de pesquisa estão dando ênfase a artifícios renováveis que cumpram funções semelhantes às contrapartes fósseis. Concomitantemente à conscientização dos consumidores e à formação de um nicho de mercado que busca por produtos de natureza renovável, dada a finitude dos recursos fósseis, Ng *et al.* (2022) destacam a urgência da implementação de tecnologias compatíveis capazes de substituir surfactantes sintéticos por produtos que possam plenamente suprir suas funções, ao mesmo tempo em que apresentem vantagens, como a de serem ambientalmente sustentáveis.

Os biossurfactantes existem naturalmente no meio ambiente e desempenham algumas funções no ecossistema mesmo sem interferências humanas. Esses surfactantes naturais podem ser derivados de diferentes tipos de plantas, a exemplo de coco e palma (KURUP, 2023). Entretanto, somente nas últimas décadas que as moléculas produzidas a partir de microorganismos com propriedades tensoativas foram descritas e chamadas de surfactantes biológicos ou biossurfactantes (FELIPE; DIAS, 2017). Estes surgem como uma opção promissora, apresentando propriedades de superfície semelhantes aos surfactantes sintéticos, mas com origem em fontes biológicas renováveis (AKBARI *et al.*, 2018).

Os biossurfactantes são um grupo vasto composto de vários tensoativos obtidos naturalmente por microrganismos como leveduras, bactérias e fungos, a partir de recursos renováveis como óleos naturais e carboidratos (SANTOS *et al.*, 2016). Essa classe de tensoativos biossurfactantes tem atraído interesse crescente no intuito de

substituir os sintéticos em diversas aplicações incluindo produções farmacêuticas, produtos de limpeza, recuperação avançada e produção de petróleo, bem como incorporação em formulações de óleos lubrificantes e diferentes soluções para tratamento de problemas ambientais, como derramamentos de óleo e biorremediações (BRUMANO; SOLER; DA SILVA, 2016; DURVAL *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2021).

No ano de 2020, o mercado de biossurfactantes foi estimado em cerca de US\$ 2,5 bilhões. O mercado global se mantém aquecido, projetado para expandir em uma taxa de 5,7 % de 2022 a 2027, atingindo um valor de \$ 3,5 bilhões até 2026 (NAGTODE *et al.*, 2023). Estes autores levantam a hipótese de que o setor está se expandindo devido à crescente demanda por biossurfactantes feitos de resíduos de biomassa e matérias primas agrícolas.

Como resultado de uma maior atenção dada à saúde, beleza e higiene pessoal nos últimos anos, alinhado com as demandas mundiais por produtos mais ambientalmente corretos, empresas líderes de mercado como a Dow, BASF, Unilever, Clariant, Evonik e Croda já apresentam em seus portfólios produtos comerciais oriundos de biossurfactantes, seja parcial ou integralmente, o que demonstra investimento e interesse das grandes corporações em se inserir no mercado de surfactantes biológicos (NAGTODE *et al.*, 2023).

Um dos desafios para a produção em larga escala de biossurfactantes é o custo de produção. Como exemplo, a produção de surfactina em pó purificada (pureza mássica de 89 %) em escala industrial é estimado entre US\$ 836,00 e US\$ 2.059,70/kg (CZINKÓCZKY; NÉMETH, 2020b). Entretanto, o uso de substratos mais baratos e novas tecnologias estão abrindo caminho para uma maior eficiência produtiva, tornando a produção de biotenssoativos promissora (BANAT *et al.*, 2014; SINGH; PATIL; RALE, 2019).

Os biossurfactantes, em geral, tendem a ter alguns benefícios em comparação com suas contrapartes produzidas por rotas químicas. Alguns dos benefícios são: maior abrangência de utilização em diferentes segmentos, biodegradabilidade, biodisponibilidade, biocompatibilidade, alta seletividade, adequação ambiental e melhor eficiência em altas temperaturas e tensões salinas (AMBAYE *et al.*, 2021).

Embora os biossurfactantes sejam apontados como alternativas mais ambientalmente sustentáveis, há uma lacuna na literatura sobre os seus efetivos impactos ambientais em comparação com os dos surfactantes sintéticos (BRIEM *et al.*, 2022). Além disso, a otimização dos processos em larga escala e a competitividade em

termos de custo em diferentes aplicações também representam desafios para a viabilidade técnico-econômica dos biossurfactantes (NG *et al.*, 2022).

Villota-Paz *et al.* (2023) apontam ser necessário novas abordagens em relação à quantificação de impactos ambientais de produtos que utilizam biossurfactantes, o que requer a utilização de ferramentas confiáveis e estudos adicionais sobre o tema. Nos últimos sete anos, começaram a surgir estudos que têm como intuito avaliar o desempenho ambiental de diferentes biossurfactantes, alguns deles em comparação com outros biossurfactantes e surfactantes sintéticos (BRIEM *et al.*, 2022).

O estudo de Schonhoff *et al.* (2022) analisa os impactos ambientais até a fase de produção de ramnolípídeos e lipídeo manosileritritol obtidos a partir de melão e polpa de beterraba como substratos; apresenta que são competitivos em termos ambientais com diferentes surfactantes sintéticos, com possibilidade de otimização futura. Entretanto, existem estudos que demonstram que alguns biossurfactantes tiveram um desempenho ambiental menos favorável quando comparados aos surfactantes sintéticos (BACCILE *et al.*, 2017; AKIZU-GARDOKI *et al.*, 2022).

Os diferentes microrganismos têm a capacidade de produzir biossurfactantes com atividades de superfície e estruturas moleculares distintas (SANTOS *et al.*, 2016; OLIVEIRA, 2022). A surfactina, pertencente à classe dos lipopeptídeos, é obtida por espécies microbianas do gênero *Bacillus subtilis* e tem recebido grande atenção por ser um dos biossurfactantes mais eficazes em várias atividades fisiológicas e bioquímicas. Ela apresenta alto potencial, seja por propriedades farmacológicas, incluindo propriedades antibacterianas e antifúngicas, como também atividades antimicoplásmicas, antivirais, anti-inflamatórias e trombolíticas, e é altamente resistente mesmo em condições adversas do meio ambiente (ZHEN *et al.*, 2023).

No entanto, a substituição da surfactina em usos que convencionalmente são de surfactantes sintéticos levantam questões importantes em relação à viabilidade técnica, econômica e ambiental. Existem alguns estudos que verificam condições de viabilidade técnica e até econômica para a produção e comercialização em maior escala (HENKEL *et al.*, 2017; MAGALHÃES, 2019; SCHMIDT *et al.*, 2021; ZHEN *et al.*, 2023), todavia, não foram encontrados na literatura artigos sobre os impactos ambientais da produção da surfactina em escala industrial.

1.2 NOTAS SOBRE A REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Foi realizada uma revisão sistemática selecionando as fontes de indexação *Science Direct*, *Web of Science* e *SciELO*, e uma combinação de *strings de busca* no intuito de encontrar artigos de revisão por pares que utilizaram a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para saneantes. Foram encontrados somente dois artigos disponíveis na literatura que avaliavam impactos ambientais de biossurfactantes e, até o mês de setembro de 2021, não havia estudo sobre ACV da surfactina (descrição no Apêndice A).

Briem *et al.* (2022) elaboraram uma revisão sistemática de literatura com mais de 2500 documentos nas bases *Scopus* e *Google Scholar* com o intuito de investigar estudos de biossurfactantes que adotaram a metodologia de ACV para avaliar os impactos ambientais. Ao fim do processo de triagem, o estudo destacou que apenas 6 artigos investigaram o impacto ambiental de biossurfactantes com uma abordagem de ACV. Entre os selecionados, nenhum deles teve como objeto da pesquisa a surfactina ou foi realizado no contexto do Brasil, local com alto potencial produtivo devido à biodiversidade e altos índices de resíduos agrícolas que podem ser usados como substratos para produção de biossurfactantes (SEGOVIA-HERNÁNDEZ *et al.*, 2022).

Em dezembro de 2023, durante uma atualização, uma busca sistemática foi conduzida nas bases de periódicos *Scopus* e *Google Acadêmico*, abrangendo títulos, resumos e palavras-chave, utilizando os termos de pesquisa "biosurfactant" AND "microbial surfactant" AND "life cycle assessment", com critérios de inclusão que requeriam a aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ambiental, o foco em estudos de biossurfactantes e a natureza original dos artigos. O resultado dessa busca foi a identificação de 86 documentos. Após a revisão dos títulos e resumos, juntamente com a aplicação dos critérios de inclusão para artigos originais (especificamente estudos de caso), apenas seis artigos satisfizeram os critérios estabelecidos. Contudo, ao examinar integralmente esses artigos, notou-se a ausência de informações sobre ACV para surfactina ou outros lipopeptídeos. Cabe ressaltar que os artigos identificados foram os mesmos previamente encontrados por Briem *et al.* (2022).

Dito isto, é possível destacar que não foram encontrados na literatura artigos de ACV para surfactina, inferindo-se que os estudos de ACV para biossurfactantes são limitados. Perante o exposto, é perceptível a lacuna de pesquisa do desempenho

ambiental da surfactina, levando em consideração as especificidades dos meios de produção, região, energia, recursos e disposição final para diferentes contextos (BRIEM *et al.*, 2022).

1.3 O DESEMPENHO AMBIENTAL

Entende-se desempenho ambiental como o resultado de atividades, produtos e serviços de uma organização em relação ao seu impacto no meio ambiente e como essa organização está gerenciando e mitigando os mesmos, como, por exemplo, lidando com a redução de emissões de poluentes (ABNT, 2022). A surfactina é um agente tensoativo promissor, mas que demanda de muitos recursos, energia e, até o momento, apresenta baixa produtividade no processo produtivo. Portanto, compreende-se a importância de avaliar o desempenho ambiental da surfactina, visando identificar seus impactos, analisar diferentes cenários e destacar oportunidades de melhorias, sendo oportuno, contrastar os resultados com outros biossurfactantes e surfactantes sintéticos comercialmente populares.

No intuito de compreender quais são os principais fatores contribuintes para os impactos ambientais em uma produção de surfactina em escala industrial, foram investigados os encargos advindos das fontes de carbono, nitrogênio, sais e minerais, assim como, os impactos gerados pelas utilidades necessárias para o funcionamento da rota biotecnológica avaliada.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho ambiental da surfactina obtida a partir da *Bacillus subtilis*, desde a extração das matérias-primas até a finalização da produção em escala industrial, para identificar as principais contribuições para os impactos ambientais avaliados e sugerir alternativas para mitigação dos mesmos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Mapear tecnologias de produção de surfactina;

- Identificar fluxos de massa e energia para a produção da surfactina com a *Bacillus subtilis*;
- Definir os inventários do ciclo de vida da produção de surfactina para os cenários industriais com diferentes insumos, utilidades e concentrações;
- Comparar os aspectos e impactos ambientais dos diferentes cenários da produção de surfactina;
- Propor alternativas visando a mitigação dos impactos ambientais na produção da surfactina.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta sessão serão apresentados aspectos norteadores da pesquisa em termos das teorias e estudos revistos sobre surfactantes, biosurfactantes e avaliação de desempenho ambiental empregando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida.

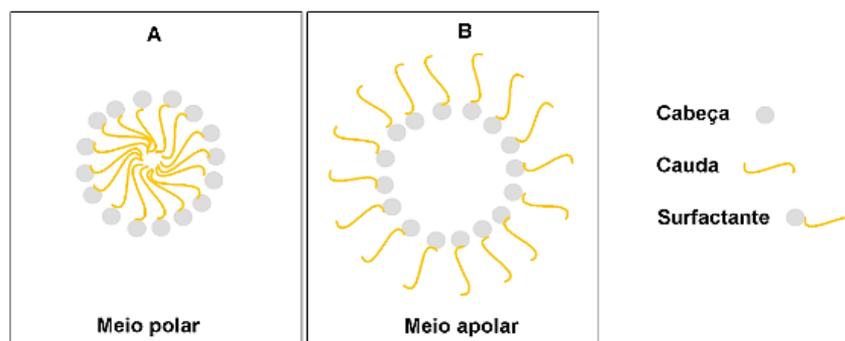
2.1 SURFACTANTES

Os surfactantes, ou agentes tensoativos, são compostos químicos amplamente empregados principalmente para usos domésticos, mas também em diversos setores industriais (MOUSAVI; KHODADOOST, 2019). Estes compostos representam uma classe de substâncias químicas que possuem afinidade para substâncias polares ou apolares, sendo essa característica conhecida como anfílica e anfipática e advém da sua estrutura molecular particular (Figura 1), o que significa dizer que parte de uma única molécula de surfactante consegue interagir facilmente com água e a outra parte tem maior tendência a interagir com substâncias oleosas (AHMADI, 2020).

Tal propriedade é responsável pelo interesse no uso dessas substâncias para a produção de detergentes e produtos de higiene ao redor do mundo. A maioria destes compostos disponíveis comercialmente são produzidos a partir de derivados de petróleo (SHABAN; KANG; KIM, 2020).

Os surfactantes são considerados os componentes mais relevantes em termos de funcionalidade e sustentabilidade ambiental do detergente (OTAZU *et al.*, 2022). Entre os anos de 2021 e 2028, o mercado global de surfactantes deverá crescer a uma taxa média de 4,9 %, passando de US\$ 41 bilhões em 2021 para US\$ 58 bilhões. A produção de surfactantes é de aproximadamente 17 milhões de toneladas anuais e a maior parte acaba sendo lançada como efluente no meio ambiente (NAGTODE *et al.*, 2023).

Figura 1 - Representação de um surfactante em meio polar e apolar



Fonte: Felipe e Dias, 2017.

A concentração onde inicia o processo de formação das micelas (micelização) é chamada de Concentração Crítica de Micelas (CMC), definida como a concentração mínima de surfactante necessária para atingir a tensão superficial mais baixa. Ao atingir o CMC, as moléculas anfipáticas são agregadas com as porções hidrofílicas posicionadas na parte externa da molécula e as porções hidrofóbicas na direção interna (Figura 1).

Os surfactantes são compostos tanto orgânicos como inorgânicos que têm a capacidade de reduzir a tensão superficial de um líquido ou a tensão interfacial entre dois líquidos, devido a sua estrutura constituída de partes hidrofílicas e hidrofóbicas (Figura 1), cujos tamanhos e formas determinam suas propriedades (PRASAD *et al.*, 2023).

As classes dos surfactantes são divididas em (a) aniônicos, (b) não iônicos, (c) catiônicos e (d) anfóteros, cada qual com uma gama de agentes tensoativos com diferentes propriedades e condições de uso, que compõe as mais diversas aplicações, que vão desde constituintes de detergentes e produtos de limpeza industrial, até fertilizantes, umectantes. Alguns dos principais surfactantes de cada classe, bem como produtos comerciais relacionados aos mesmos e variadas aplicações estão apresentados no Quadro 1.

A maioria dos sistemas de esgoto urbano contém uma enorme variedade de poluentes e a entrada nos corpos d'água traz muitos riscos, sendo os detergentes com propriedades de limpeza uns dos principais contaminantes no esgoto urbano (PÉREZ-LÓPEZ; ARREOLA-ORTIZ; ZAMORA, 2018, JAFARI; HASSANZADEH, 2020). Os

surfactantes são considerados um dos contribuintes mais críticos na composição de detergentes, pois em grande parte podem esgotar e danificar a micro e macrobiota do ambiente aquático e terrestre, principalmente pelo descarte imprudente em corpos hídricos adjacentes, ao qual deveria haver um pré-tratamento dos efluentes surfactantes antes de seu descarte (REBELLO *et al.*, 2020).

Quadro 1 - Classes, moléculas e produtos de surfactantes.

Classe de surfactante	Principais surfactantes	Principais produtos
Aniônicos	Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS), Lauril éter sulfato de sódio (LESS), Sulfato de alquil de sódio (SAS), Sulfato de éter de lauril (SLES).	Detergentes, fertilizantes, extração de óleos e combustíveis, produtos agrícolas, insumos etc.
Não Iônicos	Álcoois, polietilenoglicóis, alquilfenóis e aminas etoxiladas	Produtos de limpeza industrial, umectantes para cosméticos e molientes
Catiônicos	Sais quaternários de amônio	Limpeza industrial, amaciantes e detergentes
Anfóteros	Betaínas	Xampu infantil, detergente para louça

Fonte: Adaptado de Bain e Company (2014) e Pirete (2018).

Por conta do amplo uso desses detergentes nas atividades humanas, as águas residuárias municipais têm indicado elevada concentração média de surfactantes, variando entre 10 e 20 mg/L, podendo chegar até 300 mg/L em efluentes industriais (DERESZEWSKA *et al.*, 2015).

2.1.1 Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS)

De acordo com Felipe e Dias (2017), o principal surfactante da classe aniônico é o Linear Alquilbenzeno Sulfonato, também conhecido como LAS, cujo consumo global, por ano, corresponde a aproximadamente $2,8 \times 10^6$ toneladas e esse número tem aumentado constantemente e, por conta disso, uma maior atenção deve ser dada em seu uso e disposição no ambiente (MUNGRAY; KUMAR 2009; ZHOU *et al.* 2018; JAFARI; HASSANZADEH, 2020).

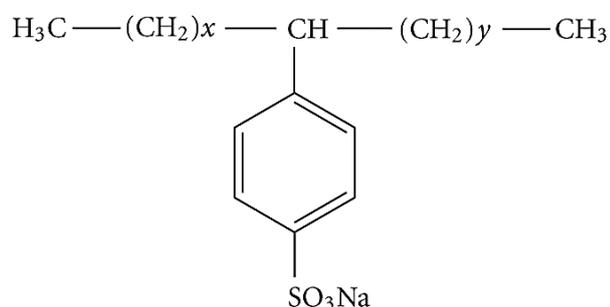
O Linear Alquilbenzeno Sulfonato, conhecido como LAS (Figura 2) é um dos

surfactantes mais utilizados mundialmente na formulação dos detergentes comerciais e, em 2018, representava 84 % do mercado de agentes tensoativos aniônicos, por ter uma grande aceitação no mercado devido ao alto potencial de limpeza quando comparado ao do sabão comum, o surfactante Lauril Éter Sulfato de Sódio ou LES (JONES-COSTA, 2018; MENEZES *et al.*, 2018).

O LAS é um surfactante aniônico que apresenta vasta utilização em produtos de limpeza, detergentes, cosméticos, indústria têxtil e outros produtos químicos industriais (FELIPE; DIAS, 2017; PIRETE, 2018).

A produção completa do LAS envolve diversas etapas. Inicialmente, é feita a síntese do Linear Alquilbenzeno (LAB) para que então seja realizada a alquilação do benzeno com alcanos lineares, geralmente na presença de um catalisador ácido. Posteriormente, o LAB é sulfonado para formar o ácido sulfônico usando ácido sulfúrico concentrado. Nesta fase, ocorre uma reação entre ácido sulfúrico e LAB para formar o sulfonato de alquilbenzeno (BERNA; CAVALLI; RENTA, 1995; LEONCIO, 2019).

Figura 2 - Estrutura química geral do Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS)



Fonte: Sablayrolles *et al.*, 2009.

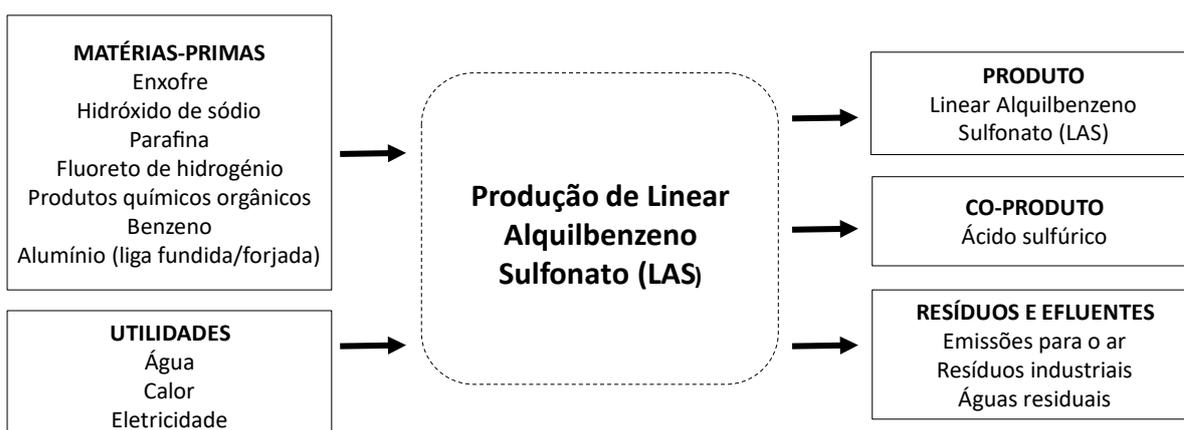
Após as etapas apresentadas, o ácido sulfônico é neutralizado com soda cáustica, o que confere a formação do sal de LAS. É necessário separar o LAS do meio reacional e em seguida purificá-lo por lavagem com água, o produto final pode ser apresentado na forma líquida ou sólida, dependendo do tipo de uso desejado (PIRETE, 2018).

Uma simplificação de entradas e saídas para um processo produtivo de LAS é apresentado na Figura 3. Apesar de muito usada, essa substância, como tantas outras produzidas pelo homem, possui uma cadeia de produção que acarreta uma série de processos que envolvem extração, manufatura e transporte. Esses processos, ao

serem realizados, geram impactos ao meio ambiente, seja liberando dióxido de carbono, consumindo água ou produzindo rejeitos químicos (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

A eficiência de remoção da degradação de solventes aniônicos em processos de aerobiose, como os solventes LAS, é frequentemente superior a 90 %, mas esta eficiência de remoção depende da concentração inicial na água. Concentrações de até 10 mg/L permitem a degradação completa, mas em concentrações mais elevadas, a mineralização e a taxa de remoção são comprometidas por efeitos tóxicos e bacterianos, reduzindo a eficácia da degradação (MOTTERAN; VARESCHE; LARA-MARTIN, 2022).

Figura 3 - Entradas e saídas da produção do Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS).



Fonte: Adaptado de ZAH e HISCHIER (2007).

Já Seyedsalehi *et al.* (2019) mostraram que houve remoção de 15 mg/L de LAS de águas residuais municipais utilizando um reator MSCR (de fluxo contínuo de sequenciamento de leito móvel), bem como foi observado uma redução de 96,4 % e 92,2 %, em DQO (Demanda Química de Oxigênio) afluyente nas concentrações de 300 mg/L e 500 mg/L, respectivamente.

O Comitê Científico de Riscos para a Saúde, Ambientais e Emergentes (SCHEER) foi encarregado de avaliar a biodegradação anaeróbia do LAS em ambientes marinhos e de água doce, com base num estudo da Universidade de Cádiz e outros dados acadêmicos. O SCHEER acredita que as experiências do estudo são

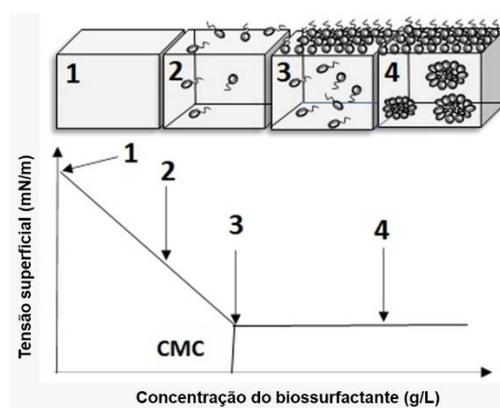
confiáveis, mas que existem certas limitações na análise estatística e na divulgação dos resultados. Propondo que existem indicações moderadas de que a degradação anaeróbica do LAS, ocorre em águas marinhas sob condições específicas, mas é insignificante em água doce. Contudo, as condições em que ocorre a degradação podem não ser indicativas de áreas afetadas por água contaminada. O comitê salienta ainda que a falta de degradação pode resultar na acumulação de LAS em sedimentos anaeróbios, causando preocupações ambientais (VIGHI *et al.*, 2020).

O entendimento existente é o de que a biodegradabilidade anaeróbia é fraca ou inexistente, por isso mais estudos devem ser elaborados nesta área para detectar o mecanismo exato de inibição e degradação (KHALIL; LIU, 2021).

2.2 BIOSURFACTANTES

Os biossurfactantes são comumente considerados como a próxima geração de surfactantes industriais (BACCILE *et al.*, 2017). O interesse em biossurfactantes é devido a suas potenciais vantagens de caráter ambiental, como maior biodegradabilidade, baixa toxicidade, uso de fontes renováveis e possibilidade de utilização de resíduos de outros processos como matéria-prima.

Figura 4 - Etapas na redução da tensão superficial em função da adição de biossurfactante até atingir a concentração micelar crítica (CMC) e formação de micelas



Fonte: Adaptado de Sarubbo *et al.*, 2022.

Além disso, os biossurfactantes podem possuir menores valores de Concentração Micelar Crítica (CMC), o que melhora sua eficiência em várias aplicações em comparação com os tensoativos sintéticos (JAHAN *et al.*, 2020). A relação da CMC e

redução da tensão superficial é apresentada na Figura 4.

Inicialmente, os biossurfactantes são introduzidos no sistema e se adsorvem à interface entre as fases imiscíveis. Essa adsorção cria uma camada superficial que diminui a tensão superficial, facilitando a interação entre os líquidos (etapa 1). À medida que a concentração de biossurfactantes aumenta, a segunda etapa envolve a formação de monômeros que continuam a se acumular na interface, contribuindo para a redução gradual da tensão superficial. Entretanto, é na terceira etapa que ocorre um ponto crucial: a concentração micelar crítica (CMC). Nesse ponto, a formação de micelas se torna mais favorável, promovendo uma redução significativa e mais eficiente da tensão superficial. Na fase final, a micelização e a estabilidade são alcançadas, onde a adição adicional de biossurfactantes resulta principalmente no aumento da quantidade de micelas, contribuindo para a estabilidade do sistema (FELIPE; DIAS, 2017; SARUBBO *et al.*, 2022).

Em 2020, o mercado de biossurfactantes foi estimado em cerca de US\$ 2,5 bilhões, o mercado global está projetado para expandir em uma taxa de 5,7 % de 2022 a 2027, atingindo um valor de US\$ 3,5 bilhões até 2026. O setor está se expandindo devido à crescente demanda por biossurfactantes feitos de resíduos de biomassa e matérias primas agrícolas (NAGTODE *et al.*, 2023).

Em termos de demanda por região, o mercado global de biossurfactantes é vasto e alcança desde o Oriente Médio, África, América do Norte, do Sul e Central, Ásia-Pacífico e Europa até a Ásia (AMBAYE *et al.*, 2021). Na Europa, o mercado dos biossurfactantes apresenta um interessante fator de crescimento, principalmente devido à grande consciencialização da sociedade, visto que, consomem mais biossurfactantes para prevenir os riscos ambientais dos surfactantes sintéticos (AMBAYE *et al.*, 2021). Ainda segundo esse estudo, a previsão de crescimento da demanda é otimista quanto a redução dos custos de produção em função de avanços tecnológicos da produção dos biossurfactantes.

A América Latina é uma região com enorme potencial devido à sua enorme biodiversidade e extensão de áreas agrícolas produtivas, que produzem subprodutos que podem ser utilizados como substratos para a produção de biossurfactantes (SEGOVIA-HERNÁNDEZ *et al.*, 2022). Meios que incorporam resíduos agroindustriais têm sido propostos como substratos para melhorar a viabilidade econômica da produção em larga escala de biossurfactantes e tornar esses produtos naturais mais

competitivos, entretanto, apesar do Brasil ser líder entre os países latino-americanos na área de biossurfactantes, apresentar altos índices de publicações e patentes, o desenvolvimento de biossurfactantes no país continua a ser um desafio, principalmente devido aos baixos fatores de conversão de substrato em produto (SANCHES *et al.*, 2021; SARUBBO *et al.*, 2022). Fatores esses que estão sendo pesquisados e têm apresentado melhores coeficientes ao longo de pesquisas realizadas com diferentes substratos residuais, diferentes metodologias e incremento de tecnologias de bioprocessos (FELIX *et al.*, 2019; JANEK *et al.*, 2021; GANESAN; RANGARAJAN, 2023).

A natureza dos biossurfactantes produzidos depende significativamente de suas fontes microbianas e da composição do substrato de crescimento fornecido, o que reflete na massa molecular dos diferentes tipos de biossurfactantes, por isso são amplamente agrupados em biossurfactantes de baixo e alto peso molecular (BAGHERI *et al.*, 2022). Entre os biossurfactantes, os glicolipídios, lipopeptídeos e fosfolipídios são compostos de baixo peso molecular (DRAKONTIS; AMIN, 2020). O Quadro 2 apresenta as principais classes de biossurfactantes e suas fontes microbianas.

Os biossurfactantes de baixo peso molecular são mais eficazes na redução da tensão superficial nas interfaces ar-água e da tensão interfacial nas interfaces óleo-água devido à sua capacidade de se adsorver na interface e reduzir a tensão superficial, já os biossurfactantes de alto peso molecular são usados de forma mais eficaz para estabilizar emulsões de óleo em água devido à sua capacidade de formar uma película estável em torno das gotas de óleo, impedindo a coalescência (UZOIGWE, 2015).

Quadro 2 - Principais classes e subclasses de biossurfactantes e suas fontes microbianas na literatura consultada.

Classes	Subclasses	Microrganismo usado	Referência
Glicolipídeos	Ramnolipídios	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Varjani e Upasani (2016)
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Sakthipriya <i>et al.</i> (2021)
		<i>Pseudomonas ssp.</i>	Hassan <i>et al.</i> (2016)
	Trehalolipídeos	<i>Arthrobacter sp.</i>	Gürkök e Özdal (2021)
		<i>Corynebacterium sp.</i>	Elshafie <i>et al.</i> (2015)
	Soforolipídeos	<i>Candida bombicola</i>	Luna <i>et al.</i> (2011)
		<i>Candida sphaerica</i>	Shah <i>et al.</i> (2017)

Classes	Subclasses	Microrganismo usado	Referência
		<i>Starmarella bombicola</i>	Niu <i>et al.</i> (2019)
	Manosileritritol Lipídeos (MEL)	<i>Pseudozyma aphidis</i>	Schonhoff <i>et al.</i> (2022)
		<i>Ustilago maydis</i>	Rocha (2017)
Lipopeptídeos	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	Haddad <i>et al.</i> (2014)
		<i>Bacillus subtilis</i> UFPEDA 438	Gong <i>et al.</i> (2009)
		<i>Bacillus subtilis</i> HSO121	Daryasafar <i>et al.</i> (2016)
		<i>Bacillus subtilis</i> E8	Dhanarajan <i>et al.</i> (2017)
		<i>Bacillus subtilis</i> DSM10	Czinkóczy <i>et al.</i> (2023)
	Liquenisina	<i>Bacillus licheniformis</i>	Vimon <i>et al.</i> (2020)
		<i>Bacillus licheniformis</i>	Thavasi e Banat (2018)
		<i>Bacillus licheniformis</i> KMP-9	Vandana e Singh (2018)
	Fengincinas	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Nanjundan <i>et al.</i> (2019)
		<i>Bacillus subtilis</i>	Sa <i>et al.</i> (2018)
	Iturinas	<i>Aspergillus carbonarius</i>	Jiang <i>et al.</i> (2020)
		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Calvo <i>et al.</i> (2019)
Fosfolipídio		<i>Acinetobacter sp.</i>	Jamal <i>et al.</i> (2011)
		<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	Wittgens e Rosenau (2018)
		<i>K. pneumoniae</i>	Jamal <i>et al.</i> (2011)
Compostos poliméricos	Emulsan	<i>Acinetobacter lwoffii</i>	Vandana e Singh (2018)
	Rufisan	<i>Candida lipolytica</i>	Vandana e Singh (2018)

Fonte: Elaboração do autor.

Johnson *et al.* (2021) apontam que os biossurfactantes apresentam vantagens potenciais sobre os surfactantes sintéticos, como a biocompatibilidade, digestibilidade, eficácia em uma ampla faixa de temperaturas e valores de pH, disponibilidade de fontes naturais, adaptabilidade e atividade antimicrobiana. Em contrapartida, apresentam que os biossurfactantes dependem do cultivo de microrganismos para sua produção e tecnologias de produção ainda não consolidadas, que resultam em maior custo de produção devido à baixa produtividade.

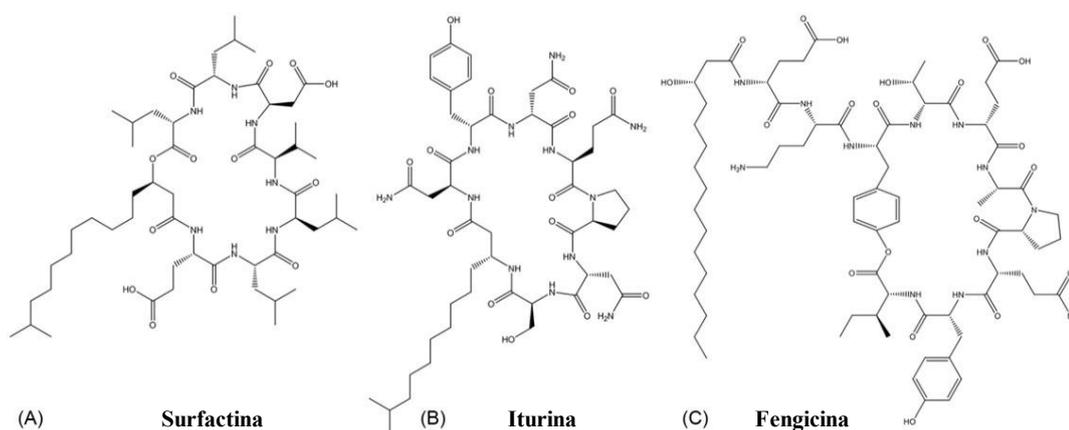
Entretanto, são necessários avanços em pesquisas para que os biossurfactantes tenham maior competitividade de mercado. A disponibilidade comercial de

biossurfactantes microbianos é bastante restrita devido às dificuldades da produção em larga escala, disponibilidade de matérias-primas renováveis de baixo custo e otimização das tecnologias de produção, recuperação e purificação (SINGH; PATIL; RALE, 2019).

Por conta dos altos custos de fabricação, especificidades de purificação e baixo rendimento, a disseminação do biossurfactante no mercado é limitada. Para superar essas dificuldades, são sugeridos avanços nos processos utilizados, substratos renováveis, técnicas alternativas de purificação empregando ácidos sustentáveis e melhora de eficiência baseado em avanços de engenharia genética (EBADIPOUR, 2016; KUMAR, 2021).

Devido a seu maior potencial para reduzir a tensão superficial, os biossurfactantes de menor peso molecular, que inclui os glicolipídeos e lipopeptídeos são utilizados com mais frequência do que os biossurfactantes de maior peso molecular (KUMAR, 2021). Os subgrupos mais significativos de glicolipídeos são ramnolipídeos, soforolipídeos, trehalolipídeos e lipídios manosileritritol, enquanto os subgrupos de lipopeptídeos são surfactinas, fengicinas e iturinas (Figura 5).

Figura 5 - Estrutura química dos lipopeptídeos surfactina(A), iturina (B) e fengicina (C)



Fonte: Adaptado de Geissler et al., 2019

Os lipopeptídeos representam o grupo mais popular dos biossurfactantes de performance, principalmente por ter ampla faixa de estabilidade em condições ambientais variadas e apresentar atividades surfactantes em concentrações relativamente baixas. Estes podem ser produzidos por fungos, bactérias e leveduras, e apresentam

características como elevada diversidade estrutural e engloba peptídeos lineares curtos ou cíclicos em combinação com uma longa cadeia de ácidos graxos (ZHI; WU; XU, 2017).

Em relação a sua estrutura, a presença de um ácido graxo específico ligado a uma porção de aminoácidos, determina um caráter anfifílico, o que justifica seu destaque para produção de lipopeptídeos, que são moléculas anfifílicas com propriedades biossurfactantes (GEISSLER *et al.*, 2019).

2.1 SURFACTINA

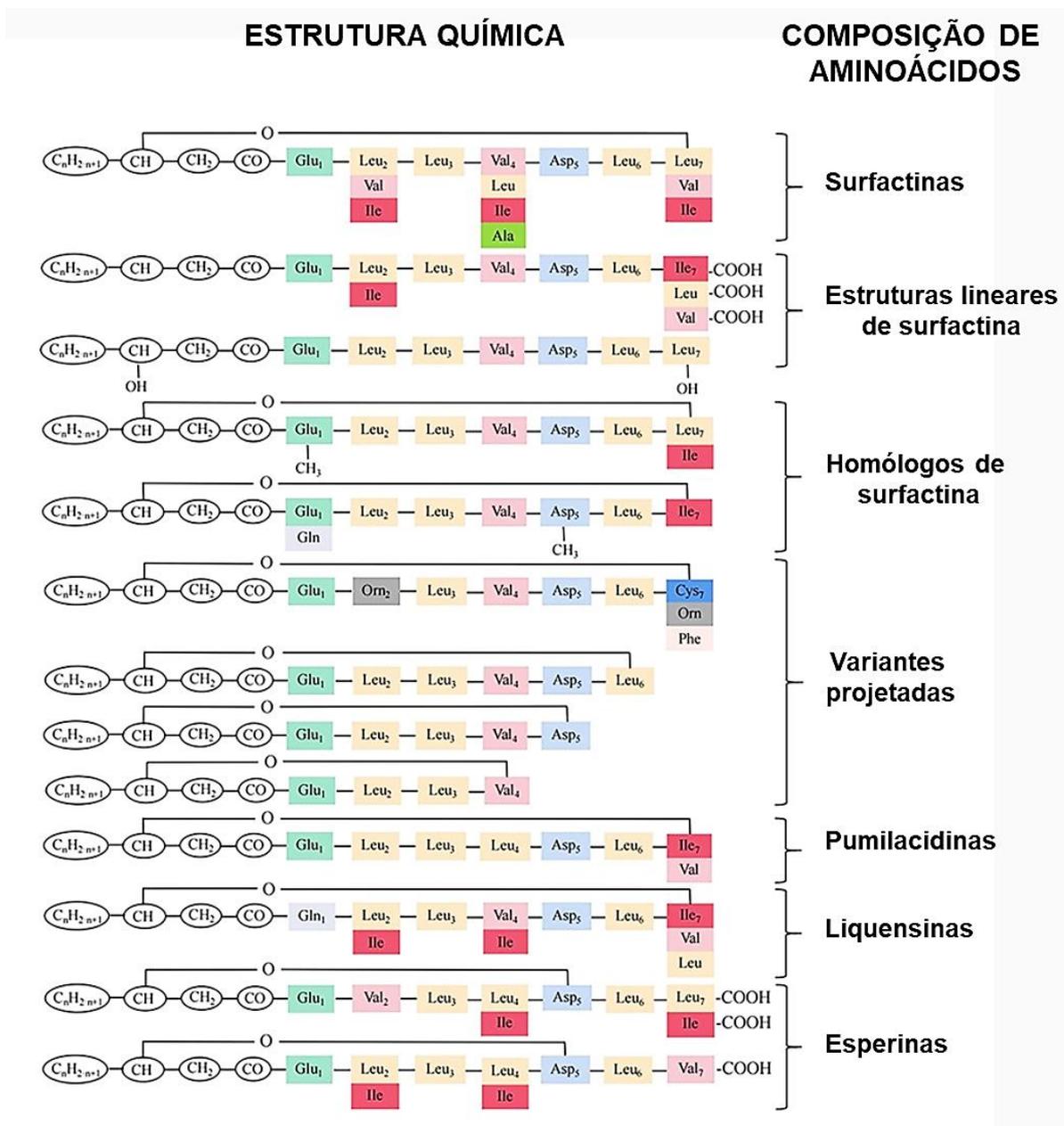
A bactéria Gram-positiva *Bacillus subtilis* produz um composto chamado surfactina, um lipopeptídeo cíclico que consiste em sete aminoácidos hidrofóbicos de cadeia longa (13–15 carbonos de comprimento e uma alça de sete aminoácidos, como Lasparagina (Asn), L-leucina (Leu), ácido glutâmico (Glu), L-leucina (Leu), L-valina (Val) e duas D-leucinas conectadas via ligação lactona (DRAKONTIS *et al.*, 2020; KARLAPUDI *et al.*, 2021). A surfactina é destacada como o lipopeptídeo natural que mais reduz a tensão superficial (KUMAR *et al.*, 2021).

A surfactina é considerada um dos biossurfactantes mais eficazes, pertence a classe dos lipopeptídeos e é produzida principalmente pela bactéria *Bacillus subtilis* (Chen *et al.*, 2020). Ela foi encontrada pela primeira vez em 1968, como metabólito secundário no caldo de fermentação produzido por *Bacillus subtilis* (ARIMA; KAKI-NUMA; TAMURA, 1968).

Além de sua atividade tensoativa, a surfactina apresenta diversas propriedades biológicas, como ação antibiótica, antiviral, anticâncer, antifúngica e anti-inflamatória, o que a torna um potencial agente farmacêutico (KRACHT *et al.*, 1999; CAMEOTRA; MAKKAD, 2004; DAS; MUKHERJEE; SEN, 2005; MEENA; KANWAR, 2015; WU *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2017; SHARMA; KANWAR, 2020; MEENA; SHARMA; KANWAR, 2020; BAINARA *et al.*, 2023).

Surfactinas, lichenisinas, pumilacidinas e esperinas são as quatro subclasses da Família Surfactina (MÜLNER *et al.* 2020; SARUBBO *et al.* 2022). As surfactinas são compostas por um heptapeptídeo lipopeptídeo de sequência: L-Glu1-L-Leu2-D-Leu3-L-Val4-L-Asp5-D-Leu6-L-Leu7 (QI, 2023). Isso forma uma estrutura de anel de lactona com uma cadeia de ácido graxo hidroxilado (HU; LIU; LI, 2019).

Figura 6 - Estrutura química e composição de aminoácidos da Família Surfactina (SF).



Fonte: Adaptado de Qi *et al.* (2023).

A Família Surfactina (SF) é categorizada em quatro subclasses: surfactinas, liquensinas, pumilacidinas e esperinas (SARUBBO *et al.*, 2022). Na Figura 6 é possível observar cada uma das quatro isoformas da surfactina (duas estruturas lineares e dois homólogos) e distinguir variações na composição dos aminoácidos no anel peptídico e alteração da cadeia lateral do ácido graxo variando de C9 a C19. Em relação

a essas variações, as mais importantes para aumentar o número de homólogos da surfactina são C14 e C15 (QI, 2023).

A estrutura da surfactina pode variar de acordo com a configuração das cadeias de ácidos graxos que compõem a parte hidrofóbica da molécula e embora seja capaz de apresentar uma configuração linear, *n*, ela também é capaz de ser ramificada, como ocorre com os termos *iso*, em que átomos de carbono adjacentes na cadeia apresentam grupos metil (CH₃) nas mesmas posições, criando uma estrutura ramificada específica e com os termos *anteiso*, que os grupos metil (CH₃) não estão nas mesmas posições nos átomos de carbono adjacentes, resultando em outra configuração de ramificação (XIA; WEN, 2022). Ao contrário do *iso*, que pode ser encontrado metil (CH₃) em comprimentos de cadeia de carbono ímpares e pares, no *anteiso*, o metil (CH₃) está presente apenas em comprimentos de cadeia de carbono ímpares (CIURKO *et al.* 2022).

Kumar *et al.* (2021) destacam que pelo menos 30 tipos de surfactina já foram descobertos com diferentes resíduos de aminoácidos e resíduos de ácidos graxos. Mas a molécula de surfactina permanece idêntica dependendo da sequência quiral.

A *Bacillus subtilis*, microrganismo responsável pela produção da surfactina, compreende um grupo de bactérias Gram-positivas, que pode ser encontrado em abundância, tanto em corpos animais, quanto em microbiota e principalmente no solo (CHEN; JUANG; WEI, 2015). As aplicações da *Bacillus subtilis* são vastas em diferentes processos biotecnológicos industriais, tanto para desenvolvimento de produtos bioativos, enzimas, como para desenvolvimento de antibióticos, surfactina, entre outros (MAIA, 2017; LARINI, 2017).

A combinação da redução eficaz da tensão superficial e uma CMC baixa torna a surfactina uma molécula interessante para diferentes aplicações que envolvem a estabilização de emulsões. A surfactina apresentou uma redução da tensão superficial da água de 72 para 27 mN m⁻¹ e apresentou baixa concentração CMC, o que justifica seu interesse e a exploração para diferentes aplicações (DATTA *et al.*, 2018; DATTA *et al.*, 2020).

Mesmo com tais vantagens, há barreiras em relação a viabilidade da produção de surfactina. A comercialização extensiva de surfactina é limitada devido aos altos custos de produção em comparação com os surfactantes sintéticos (MEI *et al.*, 2021). Há expressivo avanço quanto as tecnologias que estão habilitando o crescimento de

escala para a produção da surfactina, mas ainda seu custo de produção impede de ser amplamente utilizada, principalmente para comercialização com viés de aplicações de baixo valor agregado. No entanto, estudos têm apontado que avanços da engenharia genética estão convergindo para uma melhor produtividade de surfactina em derivados com atividades biológicas melhoradas, especializadas ou expandidas (THÉATRE *et al.*, 2021)

A comercialização da surfactina é dificultada por seus altos custos de produção, atribuídos ao baixo rendimento de fermentação e à difícil separação (MEENA *et al.*, 2020). As formas mais tradicionais de produção apresentam baixa produtividade. Para a sacarose como substrato por exemplo, alguns estudos apresentam valores que variam de 0,8 a 2,5 g.L⁻¹ em massa de surfactina por volume de meio de cultivo (AMANI *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2013; FRANÇA *et al.* 2021). Outros fatores responsáveis pelos altos custos são as grandes quantidades de impurezas da fermentação, o que dificulta a purificação e produção em larga escala (HU *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, têm sido propostas diversas estratégias para a produção de surfactina em larga escala, como a utilização de fontes alternativas de carbono e nitrogênio para o crescimento de *B. subtilis*, uso de resíduos agroindustriais como fonte de nutrientes para o crescimento das bactérias, além de processos de fermentação em estado sólido e de alta densidade celular (SATPUTE *et al.*, 2016; KIM *et al.*, 2018; FARZAND *et al.*, 2020).

Na produção de biosurfactantes, a variável mais importante a ser levada em consideração é a fonte de carbono, pois afeta diretamente o crescimento do microrganismo, bem como na estrutura e o rendimento da molécula alvo do biosurfactante (SARUBBO *et al.*, 2022). É necessário também considerar uma fonte adequada de nitrogênio, já que o crescimento de microrganismos é fortemente afetado pela disponibilidade de nitrogênio, o qual participa da síntese de metabólitos tais como os biosurfactantes (SARUBBO *et al.*, 2022).

Diferentes estudos avaliam a influência das fontes de carbono e nitrogênio na produtividade e eficiência da surfactina, a exemplo de Joshi *et al.* (2008) que testou 14 tipos de fontes de carbono em meio mínimo (glicose, maltose, frutose, sacarose, lactose, melação, soro de queijo, metanol, etanol, propanol, heptano, querosene, óleo de parafina e óleo de semente de algodão) e obteve melhor redução da tensão superficial utilizando melação ou glicose como fonte de carbono, ambos com 30,5 mN/m.

As fontes de nitrogênio utilizadas na produção de surfactina são orgânicas (por exemplo, extrato de levedura, extrato de carne bovina, uréia, triptona, hidrolisado de caseína etc.) ou inorgânicas (por exemplo, NH_4Cl , NaNO_3 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) (CHEN; JU-ANG; WEI, 2015).

Diferentes estudos destacam a ênfase em utilizar substrato de menor custo aquisitivo, sendo alguns deles residuais, como melão de tâmara (AL-BAHRY *et al.*, 2013), farinha de atum e batata (ZOUARI; ELLOUZE-CHAABOUNI; GHRIBI-AYDI, *et al.*, 2014), licor residual de milho (GUDINA *et al.*, 2015), óleo de parafina leve (DATTA *et al.*, 2018), suco de caju (FELIX *et al.*, 2019), resíduo de glicerol bruto (JANEK *et al.*, 2021), melão de cana (ROCHA *et al.*, 2021) e suco de uva (GANESAN; RANGARAJAN, 2023).

O fator de custo nos insumos de produção justifica as investigações sobre vários substratos para a produção de surfactina, o uso de substratos baratos na produção de biossurfactantes pode reduzir de 10 a 30 % dos custos totais envolvidos (PEREIRA *et al.*, 2013; KANDASAMY *et al.*, 2019).

A surfactina, por ser um composto lipopeptídico de molécula pequena, dificulta os processos separação e purificação por ser semelhante às impurezas dos meios de cultura, como peptídeos, proteínas de moléculas pequenas e lipopeptídeos (HU *et al.*, 2022). Como resultado, a separação e purificação da surfactina representam quantitativos expressivos nos custos de produção, chegando a representar 50 % em alguns casos, o que dificulta o desenvolvimento e ampla utilização da surfactina (VICENTE *et al.*, 2021).

Embora a *B. subtilis* possa produzir surfactina em condições anaeróbias, as concentrações obtidas são significativamente menores do que os obtidos em processos aeróbios, o que inviabiliza a produção de surfactina por rota anaeróbia usando as cepas e tecnologias predominantes (GUDINÃ; TEIXEIRA, 2022).

Os métodos mais tradicionais de separação e purificação da surfactina incluem precipitação ácida, extração com solvente orgânico e extração por salga (Quadro 3), entretanto, esses métodos apresentam baixa quantidade de obtenção de surfactina, com extração e purificação ineficientes, dificultando o uso em maior escala (HU *et al.*, 2022).

Quadro 3 - Diferentes técnicas de purificação para biossurfactantes.

Método	Propriedade do biossurfactante que promove a separação	Vantagens
Precipitação ácida	Os biossurfactantes tornam-se insolúveis em valores baixos de pH.	Eficiente na recuperação de biossurfactante bruto, baixo custo
Extração com solvente orgânico	Os biossurfactantes são solúveis em solventes orgânicos devido à extremidade hidrofóbica.	Eficiente na recuperação de biossurfactante bruto e purificação parcial, natureza reutilizável
Precipitação de sulfato de amônio	Salga de biossurfactantes poliméricos ou ricos em proteínas	Efícaz no isolamento de biossurfactantes poliméricos
Adsorção em carvão ativado por madeira	Os biossurfactantes são adsorvidos em carvão ativado e podem ser dessorvidos usando solventes orgânicos.	Biossurfactantes altamente puros, processos mais baratos, reutilizáveis, possível recuperação de cultura contínua
Adsorção em resinas de poliestireno	Os biossurfactantes são adsorvidos em resinas de poliestireno e posteriormente dessorvidos com solventes orgânicos.	Biossurfactantes altamente puros, processos mais baratos, reutilizáveis, possível recuperação de cultura contínua
Centrifugação	Biossurfactantes insolúveis são precipitados devido à força centrífuga.	Efícaz na recuperação de biossurfactante bruto, reutilização
Cromatografia de troca iônica	Biossurfactantes carregados são ligados a resinas de troca iônica e podem ser eluídos com tampão.	Alta pureza, recuperação rápida, reutilização
Fracionamento de espuma	Forma biossurfactante e partição em espuma.	Útil em processos de recuperação contínua, alta pureza do produto, recuperação de cultura contínua
Ultrafiltração	Os biossurfactantes formam micelas acima de sua concentração micelar crítica (CMC), que não permeiam membranas poliméricas.	Recuperação rápida em uma única etapa, alto nível de pureza e capacidade de reutilização de membrana

Fonte: Adaptado de Sarubbo *et al.*, 2022.

Referente às técnicas de purificação da surfactina, a taxa de recuperação do fracionamento de espuma apresentado no estudo de Gurjar e Sengupta (2015) obteve como resultado valores de 69,2 %. A separação por membrana, como na ultrafiltração, encontrou problemas como polarização de concentração e baixo fluxo de permeado (ZANOTTO *et al.*, 2019). Apesar de sua alta taxa de recuperação, métodos alternativos, como a floculação, causaram poluição secundária e exigiram grandes

quantidades de caldo de fermentação (ZHANG *et al.*, 2014). Ainda não foi encontrado uma maneira simples e barata de se obter surfactina de alta pureza (HU *et al.*, 2022).

Quanto ao processo de recuperação final, Hu *et al.* (2022) compara dois métodos de recuperação final da surfactina e destaca que a liofilização por *Freeze-drying* foi mais eficiente do que a extração ácida com acetato de etila. Em contrapartida, o processo apresenta um maior consumo de energia no processo.

Por conta da alta capacidade de formação de espuma em biorreator aerado, o desenvolvimento de bioprocessos escaláveis para sua produção é um grande gargalo (COUTTE *et al.*, 2017). A tecnologia de produção de surfactina mais usual se dá por borbulhamento seguido de purificação com extração por solvente, a literatura apresenta outras formas de produzir, a exemplo de aeração com contactores e por discos rotativos, e diferentes formas de purificar, como coleta de espuma ou ultrafiltração (COUTTE *et al.*, 2010; CHTIOUI *et al.*, 2012; BURGHOFF, 2012; RANGARAJAN; DHANARAJAN; SEN, 2014).

Magalhães (2019) realizou uma simulação do bioprocessos mais comuns de produção e purificação juntamente com formas alternativas, o que resultou em quatro cenários, dois desses de produção por borbulhamento e coleta de espuma variando o processo de purificação entre extração por solvente e ultrafiltração, e os outros dois cenários são produzidos por aeração por membranas contactoras com alternância na purificação entre extração por solvente e ultrafiltração. O estudo concluiu que os cenários que utilizavam a produção por borbulhamento resultaram nos maiores índices de Valor Presente Líquido (VPL) em todas as capacidades avaliadas, independente dos métodos de purificação utilizados, tanto a extração por solvente quanto por aeração não dispersiva com membranas contactoras e apresentaram quantitativos próximos.

Ainda que não haja muitas informações na literatura sobre tecnologias baseadas em *Bacillus subtilis* para escala industrial, Czinkóczy e Németh (2020a) criaram uma avaliação técnico-econômica para a produção de surfactina e liquenisina. Foi feita uma simulação de processo usando o SuperPro Designer[®] a partir de dados experimentais laboratoriais. O cenário projetado utiliza de ciclones coletores de espuma e secagem por liofilização (conhecida por *Freeze-drying*) produzindo 18 toneladas de surfactina por ano. O menor custo total de investimento obtido foi com o compartilhamento de equipamentos para a produção de surfactina e liquenisina com um VPL = 0

em 7,2 anos. Já a produção independente dos biossurfactantes apresentam maior custo de investimento, mas aumenta a produtividade.

Existem diferentes estudos experimentais de produção de surfactina em escala laboratorial e em biorreatores de menor capacidade (Quadro 4). As fontes de carbono e nitrogênio são variadas, da mesma forma que a concentração final de surfactina.

É relevante estabelecer uma distinção entre a eficácia e a eficiência de um biossurfactante, a eficácia se refere à capacidade de reduzir a tensão superficial para valores mínimos, enquanto a eficiência é associada à concentração de biossurfactante necessária para induzir uma redução significativa na tensão superficial da água (OLIVERA *et al.*, 2013). Esta última métrica pode ser determinada a partir da Concentração Micelar Crítica (CMC) do biossurfactante e diversos são os fatores que influenciam na natureza e quantidade de surfactante produzido, com destaque para os tipos de cepas, condições de cultivo e disponibilidade de nutrientes no meio de cultura (MABROUK *et al.*, 2022).

Quadro 4 - Características de experimentos da produção de surfactina.

Substrato	Microorganismo	Fonte de nitrogênio	Escala de fermentação	Concentração de biossurfactante (g/L)	Referência
Glicose	<i>B. subtilis</i> ATCC 21332	Nitrato de amônio	5L- biorreator	6,45	Yeh (2006)
Sacarose	<i>B. subtilis</i>	Sulfato de amônio	<i>Shake flasks</i>	2,5	Amani (2010)
Sacarose	<i>B. subtilis</i> #309	Nitrato de amônio	<i>Shake flasks</i>	0,844	Pereira (2013)
Glicose	<i>B. subtilis</i> DSM 10T	Cloreto de amônio e Nitrato de sódio	2,5L- biorreator	3,99	Willenbacher (2014)
Glicose	<i>B. subtilis</i> DSM10	Nitrato de amônio	1L- biorreator	4,99	Czinkóczy (2020b)
Sacarose	<i>Bacillus subtilis</i> LAMI005	Sulfato de amônio	<i>Shake flasks</i>	0,92	França <i>et al.</i> (2021)
Glicerol (resíduo de sabão)	<i>B. subtilis</i> #309	Nitrato de amônio	<i>Shake flasks</i>	2,8	Janek <i>et al.</i> (2021)
Melaço de cana	<i>Bacillus subtilis</i> RSL-2	Não foi utilizada*	<i>Shake flasks</i>	12,34	Verma (2021)

*O melaço contém um alto teor de açúcar (30–50 %), juntamente com nitrogênio, fósforo e outros elementos.

Fonte: Elaboração do autor.

De acordo com Fenibo, Douglas e Stanley (2019), os principais problemas com os biossurfactantes são a baixa produtividade, a rara ocorrência de superprodutores

naturais ou cepas recombinantes, o problema da alta formação de espuma e dificuldade para escalar os processos, demandando grande quantidade de recursos financeiros. A busca por estratégias mais eficientes e econômicas de produção e recuperação de surfactina é, portanto, uma área de grande interesse técnico-científico (VICENTE *et al.*, 2022).

Devido a discrepâncias significativas na atividade biológica entre subclasses, isômeros e homólogos de surfactina, alguns surfactantes altamente bioativos ainda demonstram baixos rendimentos no produto final purificado. Mesmo em categorias que alcançam elevados rendimentos, o processo de purificação torna-se complexo devido à persistente presença de isômeros e homólogos. Essa complexidade na etapa de purificação representa uma barreira significativa na produção eficiente de surfactantes, exigindo estratégias aprimoradas para assegurar a pureza desses compostos essenciais em contextos biotecnológicos e industriais (QI *et al.*, 2023).

O desejo por substâncias surfactantes diferentes, novas ou puras tem impulsionado a construção de uma rede metabólica e regulatória mais abrangente, com estratégias de modificação genética a serem implementadas para superar as limitações da surfactina em cepas selvagens (WU *et al.*, 2019).

Por meio de modificações de engenharia genética, *B. subtilis* 168S35, o estudo de Wu *et al.* (2019) iniciou com um título de surfactina de 0,4 g/l em *Bacillus subtilis* 168. Após a restauração da atividade biossintética, a eliminação de genes competidores e a melhoria na tolerância celular, o título foi progressivamente aumentado para 12,8 g/l. Essas estratégias representam avanços significativos na produção eficiente de surfactina.

Recombinado geneticamente, a *B. velezensis* F34 apresentou-se estável e com rendimento de surfactina 4 vezes maior do que a cepa original (CHEN *et al.*, 2020). A partir da compreensão sobre a complexa rede metabólica e o mecanismo regulador global, a produção de surfactina vem sendo melhorada pela fermentação combinada de engenharia metabólica. Foi relatado por Klausmann *et al.* (2021) em um meio de glicose e $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ em biorreator de 30 litros uma concentração de surfactina de até 26,5 g/L, o qual é o nível de produção mais alto relatado na literatura e estabelece as bases para uma produção industrial factível (QI *et al.*, 2023).

Mesmo produzindo com altos custos, a surfactina é comercializada mundialmente e pode ser encontrada na *BOC Sciences., Ltd*, que é uma empresa

especializada em síntese, biossíntese, purificação e caracterização de pequenas moléculas. A comercialização da surfactina (CAS 24730-31-32) está no preço de 299 US\$/g (BOC Sciences, Ltd, 2023). O preço do pacote de 10 mg de surfactina com purificação de 98 % comercializados pela *MilliporeSigma* está no preço de US\$263 (MILLIPORESIGMA, 2023).

Quanto ao entendimento da viabilidade da produção de surfactantes no aspecto ambiental, o método de avaliação de ciclo de vida é apresentado pela literatura como uma ferramenta adequada (TALWAR; HOLDEN, 2022), o qual é descrito a seguir.

2.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV): FUNDAMENTOS

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surgiu da crescente preocupação ambiental e da necessidade de utilizar recursos naturais de forma mais sustentável. A *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) iniciou o processo de normalização da ACV na década de 1980, resultando no documento “Diretrizes para a Avaliação do Ciclo de Vida: um código de conduta”. Desde então, a metodologia da ACV tem sido aprimorada continuamente, em 1997 foi publicada a ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliações do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Essa norma tem sido atualizada regularmente, sendo a versão mais recente publicada em 2009 (ABNT, 2009a).

No Brasil, a discussão em torno da ACV começou na década de 1990, culminando com a criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), em 2002. Um dos objetivos da ABCV é fomentar a pesquisa, o ensino e o desenvolvimento da ACV. Em 2010, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações criou o Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV), com o objetivo de promover e disseminar a técnica, gerir e manter o banco de dados e incentivar a criação de inventários do Ciclo de Vida (IBICT, 2021).

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite quantificar os impactos ambientais decorrentes de um produto ou serviço em diversas categorias, tornando-se relevante para a tomada de decisão de organizações (FERRARI *et al.*, 2021). No entanto, a falta de dados confiáveis para a avaliação de impactos, bem como a dificuldade em obter tais dados, associada à aplicação de métodos de avaliação de impacto de regiões diferentes daquela em estudo, constituem grandes desafios para a realização da ACV (PATOULLARD *et al.*, 2019; BELKHIR; LOUHAB;

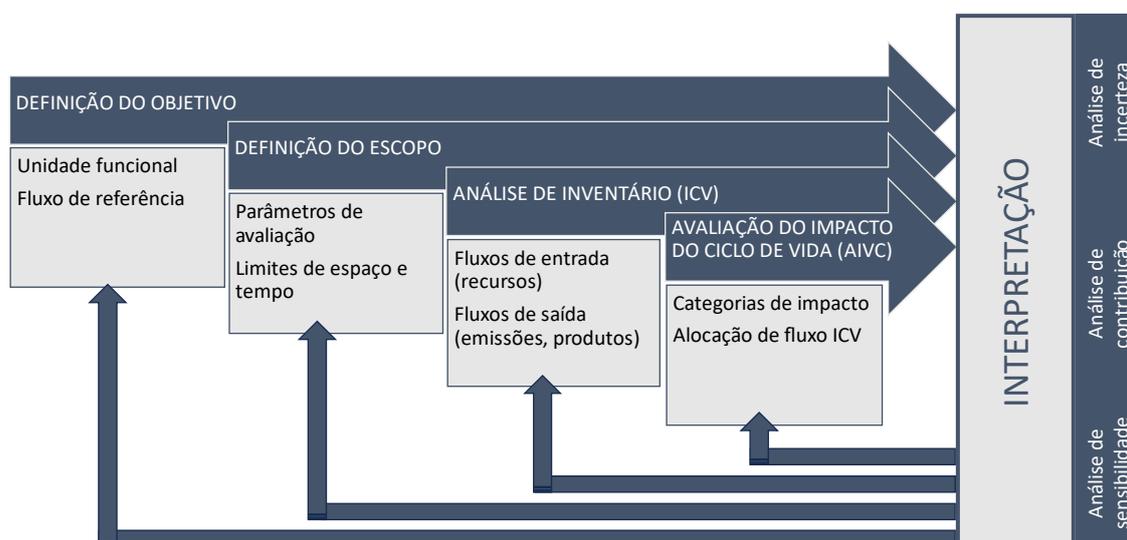
BOUGHERARA, 2022).

O desempenho ambiental de um produto ou processo durante todo o seu ciclo de vida pode ser avaliado a partir da ACV (Avaliação de Ciclo de Vida), que consiste em analisar os aspectos ambientais de um sistema de produto de acordo com as fronteiras do sistema (SAHOO; BERGMAN; KHATRI, 2021).

De acordo com as recomendações das normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b), associadas aos produtos, a ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que visa avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais e suas fases encontram-se descritas conforme a Figura 7. As fases individuais utilizam os resultados de outras fases, o que contribui para a completeza e consistência do estudo e dos resultados relatados.

Na definição do objetivo e escopo descreve-se de forma clara todos os itens sugeridos pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), dentre esses itens, tem-se a definição da função do sistema, unidade funcional, sistema de produto e suas fronteiras, tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto, limitações, entre outros pontos a serem definidos.

Figura 7 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).



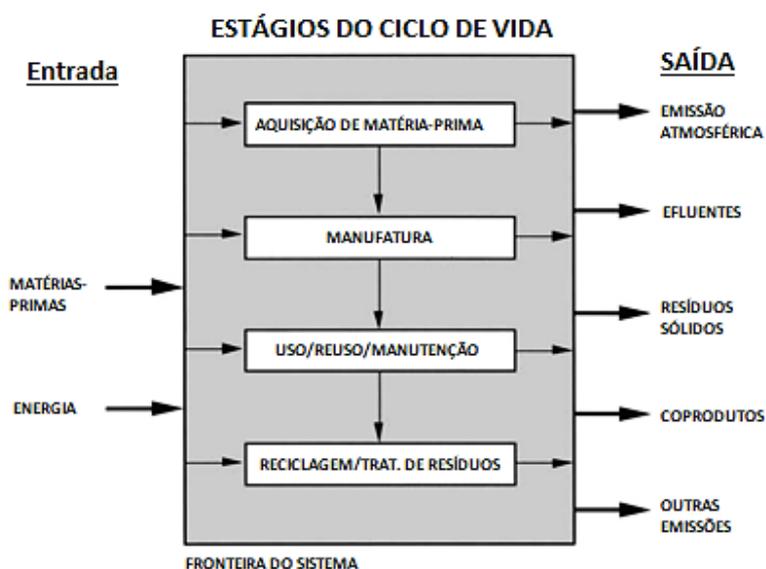
Fonte: Adaptado da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a)

A unidade funcional define o que vai ser estudado, portanto, tem o propósito de

fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas, necessário para garantir a comparabilidade dos resultados da ACV e definir a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto (ABNT, 2009a). Dessa forma, mesmo quando diferentes sistemas estão sendo avaliados, a comparação entre eles é feita por meio de uma base comum. Ainda de acordo com a norma, é importante determinar o fluxo de referência em cada sistema para satisfazer determinada função (DEMARCO; FORTIER, 2022).

A definição das fronteiras do estudo é importante para a coleta de dados e para as análises subsequentes. Há quatro termos comumente utilizados para descrever as fronteiras de um estudo de ACV. O termo “berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*) abrange a extensão do berço ao túmulo, ou seja, desde a extração das matérias-primas, passando pelas etapas de transporte, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final de forma a compreender os impactos gerados (SAHOO; BERGMAN; KHATRI, 2021).

Figura 8 - Diagrama dos estágios do ciclo de vida



Fonte: Adaptado de CURRAN et al. (2020)

A abrangência do tipo “berço ao portão” (*cradle-to-gate*), considera o consumo de recursos até a fase de produção. Já a delimitação “portão ao túmulo” (*gate-to-grave*) tem seu limite na produção até a disposição final de determinado produto, enquanto “portão ao portão” (*gate-to-gate*), considera unicamente a etapa de produção (EVANGELISTA, 2017). Na etapa da análise de Inventário, que se inicia após a

definição de objetivos e metas, ocorre a preparação e estratégias para a coleta de dados, e então quantificação dos dados dos requisitos de energia e matéria-prima, emissões atmosféricas, emissões veiculadas pela água, resíduos sólidos e outras liberações para todo o ciclo de vida de um produto, embalagem, processo, material ou atividade (CURRAN, *et al.*, 2020). Os dados podem ser organizados conforme os estágios do ciclo de vida correspondentes ao estudo (Figura 8).

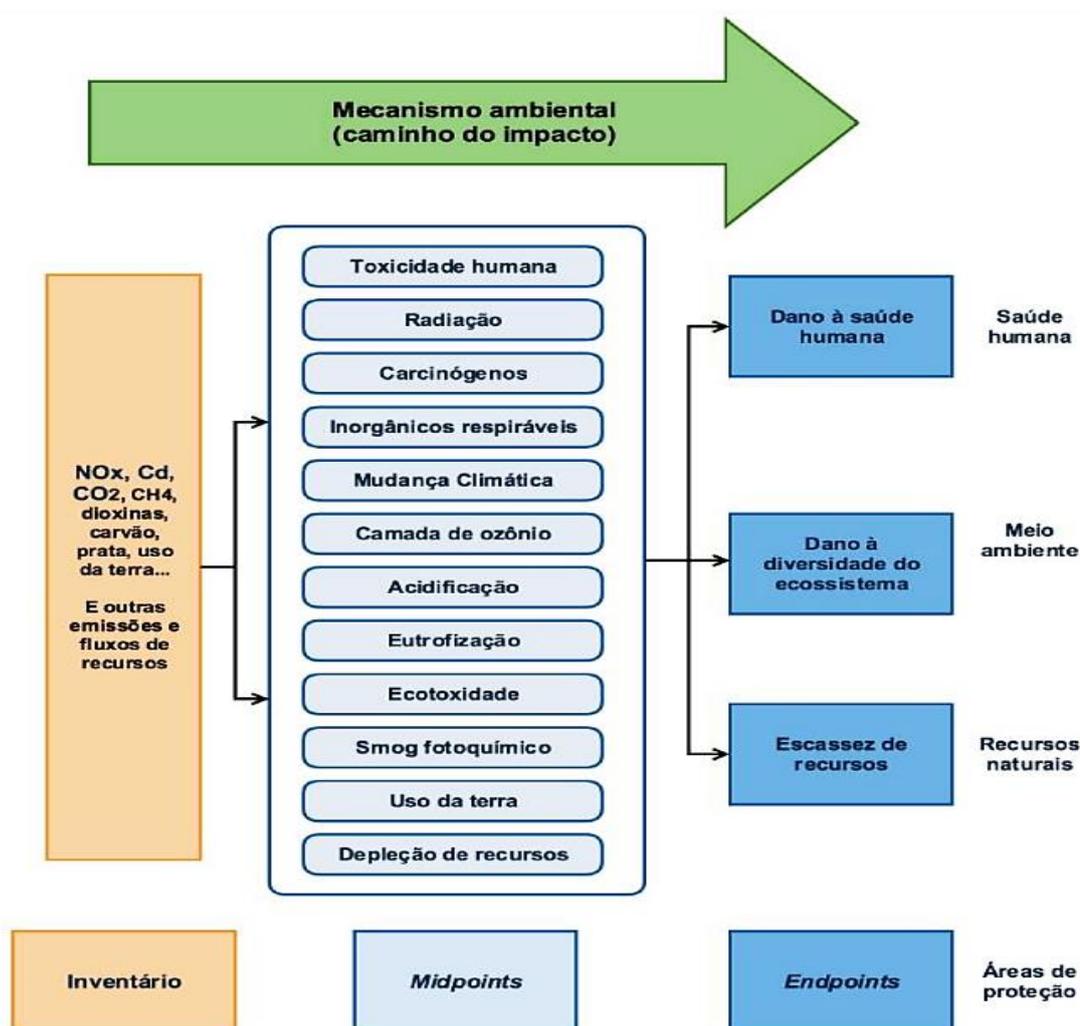
Na fase de Avaliação de Impacto, ocorre a ponderação dos impactos ambientais potenciais usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida, são analisados os quantitativos do inventário com impactos ambientais específicos na tentativa de compreender estes impactos buscando identificar, caracterizar e avaliar os potenciais impactos das intervenções ambientais identificadas na etapa de análise de inventário (ABNT, 2009a, 2009b).

As categorias de impacto são avaliadas de acordo com os dados obtidos no decorrer do estudo, juntamente com pesquisas de impactos ambientais do objeto de estudo, ou afins, previamente realizadas. Alguns contribuintes significativos para os impactos ambientais podem ser: demanda acumulativa de energia, potencial de aquecimento global, toxicidade humana e esgotamento de água (GUINÉE, 2015).

Os métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) simulam o impacto ambiental de cada componente do inventário e/ou do fluxo de recursos usando um modelo de caracterização. Cada método fornece uma coleção de multiplicadores baseados em fatores de equivalência para cada espécie de impacto que está sendo avaliada (PARLERMO, 2021).

Os métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) podem ser classificados em dois grupos com vantagens e desvantagens distintas, dependendo da abordagem de seus indicadores. O primeiro grupo utiliza a abordagem de ponto médio (*midpoint*), que se concentra nos problemas ambientais, enquanto o segundo grupo adota a abordagem de ponto final (*endpoint*), que considera os danos ambientais, estes são comumente divididos em “áreas de proteção” que são: dano à saúde humana, dano à diversidade do ecossistema e escassez de recursos, como representado na Figura 9 (OLIVEIRA, 2017).

Figura 9 - Distinção entre os métodos midpoint e endpoint



Fonte: Oliveira (2017).

Os métodos AICV são combinações de várias categorias de impacto previamente definidas com base em modelos de caracterização específicos, sendo que existem diferentes métodos para avaliação de impacto de ciclo de vida, alguns deles estão apresentados no Quadro 5 (ROSENBAUM *et al.*, 2018).

Quadro 5 - Métodos de avaliação de impacto.

Método	Local	Abordagem	Quant. de categorias de impacto
ReCiPe 2016	Holanda	<i>Midpoint / endpoint</i>	18 / 03
ReCiPe 2008	Holanda	<i>Midpoint / endpoint</i>	18 / 03
Ecological Scarcity 2013	Suíça	<i>Midpoint endpoint/</i>	20
CML AI	Holanda	<i>Endpoint</i>	16
Impact 2002+	Suíça	<i>Midpoint / endpoint</i>	11 / 03
TRACI 2.1	Estados Unidos	<i>Midpoint</i>	12
Eco-indicator 99	Holanda / Suíça	<i>Endpoint</i>	11
ILCD 2011 midpoint+	Europa	<i>Midpoint</i>	11
EDIP 2003	Dinamarca	<i>Midpoint</i>	9
EPS 2000	Suécia	<i>Endpoint</i>	5
USEtox	Suíça	<i>Midpoint</i>	2
IPCC 2013	Global	<i>Endpoint</i>	1
CED	Global	<i>Midpoint</i>	1

Fonte: Adaptado de Palermo (2021).

A utilização de diferentes métodos diz respeito ao escopo e especificações de cada estudo em questão, por exemplo, o método do IPCC 2013 GWP, utiliza os fatores de conversão divulgados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC 2013). Tal abordagem permite a análise e quantificação do potencial direto de aquecimento global gerado pelas emissões atmosféricas decorrentes de um produto, convertendo os resultados em uma unidade de medida comum (kg CO₂ equivalente). Nesse contexto, o CO₂ é considerado como um parâmetro de referência global, sendo utilizado para caracterizar a pegada de carbono. A pegada de carbono é uma métrica que avalia o potencial de aquecimento global de um produto ou serviço ao longo de um horizonte temporal de 100 anos (NEVES, *et al.*, 2018).

O método *Cumulative Energy Demand* (CED), é um indicador para operacionalização da quantificação de consumo energético para ACV, portanto, é um modelo de contabilização de recursos que utiliza o poder calorífico dos materiais como unidade de agregação, analisando recursos energéticos e biomassa (UGAYA; ALMEIDA; FIGUEIREDO, 2019).

Por exemplo, Akizu-Gardoki *et al.* (2022) apresenta em seu estudo os resultados (CED) do detergente DD456 que revelou que o impacto total na demanda de

energia é de $3,53E-04$ MJ para Energia não renovável, biomassa; $4,76E-01$ MJ para Energia renovável, água; $1,42E+01$ MJ para Energia não renovável, fóssil; $1,07E+00$ MJ para Energia não renovável, nuclear; $5,40E-01$ MJ para Energia renovável, biomassa; e $8,83E-01$ MJ para Energia renovável, eólica, solar e geotérmica. Esses valores quantificam os impactos totais de energia ao longo das diferentes fases de produção do detergente DD456 e fornecem informações relevantes para avaliações de sustentabilidade e impacto ambiental.

Já o método USEtox, o qual é amplamente abrangente pois considera a avaliação toxicológica de poluentes em relação à saúde humana e à qualidade da água doce. Esse modelo é composto por sete compartimentos ambientais distintos: águas superficiais, ar urbano, ar rural, aquíferos, oceano, solo industrial e solo de agricultura (LI *et al.*, 2022). Esse método descreve duas categorias de impacto, a ecotoxicidade e toxicidade humana – subdivida em cancerígena e não-cancerígena.

Van Hoof *et al.* (2011) tinham o interesse de avaliar e comparar os impactos ambientais de produtos de consumo, com ênfase na ecotoxicidade em água doce, em um contexto de rotulagem ambiental. O método USEtox permitiu a avaliação abrangente dos impactos ecotoxicológicos dos diferentes produtos de lavanderia, considerando múltiplas categorias de impacto ambiental. A abordagem foi importante porque, em contextos de rotulagem e comunicação ambiental, é necessário fornecer informações detalhadas e confiáveis sobre o ciclo de vida dos produtos.

O método ReCiPe é uma abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) que combina elementos dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2002 (RASHEDI; KHANAM, 2020). O Eco-indicador 99 é um método estabelecido na ACV que se concentra em várias categorias de impacto, como mudança climática, depleção da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, entre outros. Ele é conhecido por sua abordagem detalhada e fatores de caracterização bem desenvolvidos. Por outro lado, o método CML 2002 também é amplamente utilizado na ACV e aborda categorias de impacto semelhantes, mas com diferentes fatores de caracterização e abordagens, oferecendo flexibilidade na escolha dos indicadores de impacto (HISCHIER *et al.*, 2010).

A integração desses métodos no ReCiPe visa aproveitar as melhores características de ambos, proporcionando uma estrutura abrangente e atualizada para avaliar uma ampla gama de impactos ambientais. Isso permite que os pesquisadores e profissionais de ACV obtenham uma visão mais completa dos impactos associados a produtos, processos e sistemas, facilitando análises mais informadas e orientadas

para a sustentabilidade em suas pesquisas e tomadas de decisões (RASHEDI; KHANAM, 2020).

O método ReCiPe é estruturado a partir dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2002, integrando e harmonizando as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura consistente (RASHEDI; KHANAM, 2020). As categorias abordadas, suas unidades e abreviações estão descritas no Quadro 6.

Na categoria de toxicidade, a metodologia ReCiPe utiliza o modelo USES-LCA 2.0, que é um sistema uniforme para avaliação de substâncias adaptado para ACV, trata-se de um modelo de destino, exposição e efeitos multimídia comumente aplicado, seus fatores de caracterização *midpoint* ou potencial de toxicidade (TP), expresso em kg equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4DCB-eq), é usado como fator de caracterização em nível médio para toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade marinha e terrestre (HUIJBREGTS *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que a avaliação do ciclo de vida implica na utilização de dados e modelos sujeitos a incertezas, como erros de medição nos dados de entrada, falta de representatividade dos dados, determinações dos limites do sistema, suposições subjacentes e lacunas na modelagem, todos os quais contribuem para a variabilidade nos resultados. Portanto, é crucial ter um entendimento da abrangência dessa incerteza ao se empregar os resultados da ACV no processo de tomada de decisões (QIN; CUCURACHI; SUH, 2020).

Quadro 6 - Categorias do método ReCiPe (2016) para avaliação de impacto do ciclo de vida.

Categoria de Impacto	Abreviação	Unidade
Ocupação de Terra Agrícola	ALOP	m ² a
Mudanças Climáticas (GWP100)	GWP100	kg CO ₂ equivalente/100 anos
Depleção de Fósseis	FDP	kg óleo equivalente
Ecotoxicidade Aquática de Água Doce	FETPinf	CTUe
Eutrofização Aquática de Água Doce	FEP	kg fosfato equivalente
Toxicidade Humana	HTPinf	CTUh
Radiação Ionizante	IRP_HE	CTUm
Ecotoxicidade Marinha	METPinf	CTUe
Eutrofização Marinha	MEP	kg fosfato equivalente
Depleção de Metais	MDP	kg ferro equivalente
Transformação de Terra Natural	NLTP	m ²
Depleção de Ozônio	ODPinf	kg CFC-11 equivalente
Formação de Partículas	PMFP	kg PM10 equivalente
Formação de Oxidante Fotoquímico	POFP	kg eteno equivalente

Categoria de Impacto	Abreviação	Unidade
Acidificação Terrestre (TAP100)	TAP100	mol H+ equivalente/ano
Ecotoxicidade Terrestre	TETPinf	kg 1,4-DCB equivalente
Ocupação de Terra Urbana	ULOP	m ² a
Depleção de Água	WDP	m ³

Fonte: Elaboração do autor.

A avaliação da incerteza, por meio de simulações de Monte Carlo ou análise de sensibilidade global, depende da disponibilidade de informações sobre a faixa ou distribuição dos parâmetros subjacentes. Embora medidas experimentais representem a fonte ideal para tais informações, elas frequentemente não estão acessíveis; portanto, na falta desses dados, o Método de Pedigree tem sido amplamente empregado na ACV para traduzir características qualitativas dos parâmetros subjacentes em métricas quantitativas de variabilidade (CIROTH *et al.*, 2016).

O estudo realizado por Weidema e Wesnaes (1996), baseado no Pedigree de avaliação de propagação de unidade numérica do sistema (NUSAP), propôs uma matriz de qualidade de dados para avaliar a relação entre as metas de qualidade de dados especificadas e a qualidade dos dados coletados. Para avaliar a qualidade do dado, foram definidos indicadores suficientes e necessários, que incluem a confiança na fonte, a completeza, a correlação temporal, geográfica e tecnológica (BENEDET, 2007; WEIDEMA *et al.*, 2013). A utilização da matriz de qualidade de dados requer julgamentos subjetivos que dependem do conhecimento da pessoa que realiza a pontuação (QIN; CUCURACHI; SUH, 2020).

Na ausência de informações de variabilidade medida, o método de pedigree permite na análise quantitativa da incerteza, ele pode ser usado para avaliar incertezas não apenas de parâmetros, mas também incertezas não paramétricas relacionadas com aspectos metodológicos, técnicos e epistêmicos de um conjunto de dados (VAN DER SLUIJS *et al.*, 2005).

Estudos como os de Ciroth *et al.* (2016) e Yang, Tao e Suh (2018) encontraram uma tendência de subestimação das incertezas subjacentes na abordagem Pedigree da base de dados Ecoinvent, ao compará-la com observações empíricas e com base de dados espaciais. Em contrapartida, no estudo de Qin, Cucurachi e Suh (2020), que entrevistou dezenas de profissionais da área de ACV, aproximadamente metade dos entrevistados foram a favor da utilização do método; os profissionais com mais de 6

anos de experiência em ACV se mostraram mais receosos devido às incertezas envolvidas.

A Tabela 1 apresenta os indicadores de qualidade de dados principiantes sugeridos pelos autores para composição da Matriz Pedigree para definições das incertezas do modelo. Cada parâmetro considerado no inventário, com base nas características catalogadas no inventário de ciclo de vida, é avaliado quantitativamente na escala de 1 a 5, sendo a pontuação 1 o indicador de melhor grau de qualidade e 5 o pior caso encontrado. Cada pontuação atribuída aos dados é avaliada com base em cinco critérios: confiança na fonte, completeza, correlação temporal, geográfica e tecnológica, e então é determinado o fator básico de incerteza, relativo ao fluxo elementar (aspecto ambiental) sob avaliação (BENEDET, 2007; WEIDEMA *et al.*, 2013).

Tabela 1 - Indicadores da Matriz Pedigree.

Pontuação do indicador (P)	1	2	3	4	5
P ₁ Confiança na fonte	Dados verificados baseados em medidas	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativa qualificada ou dados derivados de informações teóricas	Estimativa não qualificada
σ^2g_1 ou GSD_1^2 ou U_1	1,00	1,05	1,1	1,20	1,5
P ₂ Completeza	Dados representativos para um número relevante de empresas durante um período que permita eliminar flutuações	Dados representativos de > 50 % do mercado durante um período que permita eliminar flutuações	Dados representativos para uma fatia pequena de empresas, mas relevante para o mercado em estudo ou dados de mais de 50 % de empresas por um curto período de tempo	Dados representativos para somente uma empresa relevante para o mercado considerado	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de empresas em um curto período de tempo
σ^2g_2 ou GSD_2^2 ou U_2	1,00	1,02	1,05	1,1	1,20

Pontuação do indicador (P)	1	2	3	4	5
P ₃ Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano de referência	Menos de 6 anos de diferença para o ano de referência	Menos de 10 anos de diferença para o ano de referência	Menos de 15 anos de diferença para o ano de referência	Data desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o ano de referência
σ^2g_3 ou GSD_3^2 ou U_3	1,00	1,03	1,1	1,20	1,5
P ₄ Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios de uma área maior que a área de estudo	Dados de uma área menor que a do estudo ou dados de uma área similar	Dados de uma área com pouca similaridade das condições de produção	Dados desconhecidos ou dados de área distinta a área de estudo
σ^2g_4 ou GSD_4^2 ou U_4	1,00	1,01	1,02	1,05	1,1
P ₅ Correlação tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e matérias do estudo	Dados de processos e materiais de mesma tecnologia, mas diferentes empreendimentos	Dado de processos ou materiais correlatos, mas mesma tecnologia ou dados de processos e materiais do estudo, mas de diferente tecnologia	Dado de processos ou materiais correlatos, mas diferente tecnologia ou dados de escala laboratorial e mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais correlatos, mas com diferente tecnologia e em escala laboratorial
σ^2g_5 ou GSD_5^2 ou U_5	1,00	1,05	1,20	1,5	2,00

Fonte: Adaptado de fatores de Weidema *et al.* (2013).

Embora a Matriz Pedigree seja amplamente empregada nos cálculos de incerteza, alguns autores questionam sua própria confiabilidade, argumentando que ela se baseia no julgamento de especialistas em vez de em documentos (LIMA, 2017). Diante desse cenário, é utilizada uma fundamentação empírica para os fatores de incerteza na abordagem da Matriz Pedigree, de acordo com a abordagem desenvolvida por Weidema *et al.* (2013), como uma proposta para novos fatores de incerteza. Os fatores fundamentais de incerteza relacionados às entradas e saídas para os diversos fluxos elementares (aspecto ambiental) são detalhados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores básicos de incerteza (sem dimensão): Incerteza Básica.

Grupo de entradas/ saídas	c	p	a
<i>Demanda de:</i>			

Grupo de entradas/ saídas	c	p	a
Energia térmica, eletricidade, produtos semi-terminados, material trabalhado, serviços de tratamento de resíduos	1,05	1,05	1,05
Serviços de transporte	2,00	2,00	2,00
Infraestrutura	3,0	3,0	3,0
<i>Recursos:</i>			
Energia primária, metais, sais	1,05	1,05	1,05
Uso da terra, ocupação	1,5	1,5	1,1
Uso da terra, transformação	2,00	2,00	1,20
<i>Poluentes emitidos na água:</i>			
DBO, OD, COD, COT, compostos inorgânicos (NH ₄ , PO ₄ , Na etc.)	-	1,5	-
Hidrocarbonetos individuais, HPA	-	3,0	-
Metais pesados	-	5,0	1,8
Pesticidas	-	-	1,5
NO ₃ , PO ₄	-	-	1,5
<i>Poluentes emitidos no solo:</i>			
Óleo, hidrocarboneto total	-	1,5	-
Metais pesados	-	1,5	1,5
Pesticidas	-	-	1,45
<i>Poluentes emitidos no ar:</i>			
CO ₂	1,05	1,05	-
SO ₂	1,05	-	-
Compostos orgânicos voláteis (não metano)	1,5	-	-
NO _x , N ₂ O	1,5	-	1,4
CH ₄ , NH ₃	1,5	-	1,20
Hidrocarbonetos individuais	1,5	2,00	-
Material particulado (MP>10)	1,5	1,5	-
Material particulado (MP10)	2,00	2,00	-
Material particulado (MP2,5)	3,0	3,0	-
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	3,0	-	-
CO, metais pesados	5,0	-	-
Emissões inorgânicas, outros	-	1,5	-
Radionuclídeos (p. ex.: Radon - 222)	-	3,0	-

Nota: Fatores de incerteza básica ($\sigma^2_{g_0}$) aplicados as entradas e saídas para os fluxos elementares; c: emissões de combustíveis; p: emissões de processos; a: emissões na agricultura.

Fonte: Ciroth *et al.* (2016) adaptado com base em Rosenbaum *et al.* (2018).

Depois da avaliação da pontuação do indicador na Matriz Pedigree (Tabela 1), seu respectivo fator de incerteza e o fator básico de incerteza na Tabela 2, pode-se determinar o grau de incerteza (intervalo de 95 % - SD_{g95}), calculado através da Equação 1 (WEIDEMA *et al.*, 2013).

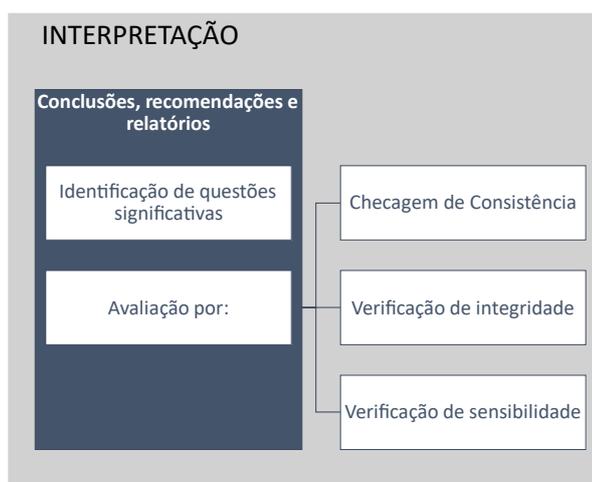
$$SD_{g95} = \sigma_g^2 = \exp\sqrt{[\ln(u_1)]^2 + [\ln(u_2)]^2 + [\ln(u_3)]^2 + [\ln(u_4)]^2 + [\ln(u_5)]^2 + [\ln(u_b)]^2} \quad (1)$$

Onde:

U1 = Fator de incerteza do indicador Confiança na Fonte;
 U2 = Fator de incerteza do indicador Completeza;
 U3 = Fator de incerteza do indicador Correlação Temporal;
 U4 = Fator de incerteza do indicador Correlação Geográfica;
 U5 = Fator de incerteza do indicador Correlação Tecnológica;
 Ub = Fator de incerteza básico (de acordo com a Tabela 2).

Na fase da interpretação acontece a identificação dos itens mais significativos com base nas etapas anteriores e análise dos resultados obtidos. Existem checagens de integridade para maior confiabilidade dos resultados, avaliação do estudo, verificações de completeza, sensibilidade e consistência, recomendações sobre os processos estudados e substituição do produto, apresentação das limitações e conclusões gerais (ABNT, 2009a, 2009b).

Figura 10 - Fase de interpretação da ACV.



Fonte: Adaptado da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a).

A Figura 10 apresenta questões relacionadas com a fase da interpretação.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV): SURFACTANTES

A literatura está repleta de artigos sobre parâmetros de produção e otimização de surfactantes de bases biológicas devido ao potencial da sustentabilidade que envolve os biosurfactantes. Todavia, são limitados os estudos que descrevem uma

metodologia detalhada sobre os potenciais impactos ambientais de biossurfactantes, a fim de identificar o efetivo compromisso com a sustentabilidade (BRIEM *et al.*, 2022). A seguir estão relatados estudos que utilizaram de metodologia de ACV para estudar surfactantes sintéticos e biossurfactantes.

A pesquisa de Baccile *et al.* (2017) realizou um estudo multidisciplinar para avaliar as oportunidades da utilização de surfactantes fermentativos de bases biológicas. Para tal, foi executado uma análise do berço ao túmulo do ciclo de vida de fosfolipídios ácidos acetilados em escala (150 L), produzidos diretamente pela *Starmarella bombicola* esterase. Entretanto, após realizar o estudo, os impactos encontrados pelos métodos ReCiPe endpoint e USEtox foram confrontados com outros produtos industriais similares, chegando ao entendimento que os soforólpidos ácidos têm um desempenho semelhante à maioria dos produtos de referência, mas em relação aos danos do ecossistema, o LAS apresentou resultados significativamente melhores. Nesse estudo, foi utilizado como fontes de carbono óleo de colza e glicose, insumos esses que representaram forte contribuição nos impactos gerais, principalmente devido intensa utilização de água. Outro ponto a ser destacado é que a comparação de mesma unidade declarada de compostos sintéticos com compostos de base biológica apresenta uma disparidade devido a inferior produtividade que é comum para os compostos de base biológica (BACCILE *et al.*, 2017).

Thannimalay e Yusoff (2014) realizaram um estudo comparativo do berço ao portão da produção de LAS e do Éster Metílico Sulfonado (MES). Para o LAS, foi considerada a importação do LAB da China e a produção do LAS na Malásia, e para o MES, foi considerado a produção na Malásia a partir do óleo de palma, ambos com unidade funcional de 1 kg de produto e avaliada pela metodologia de impacto Ecoindicator 99 (método que apresenta os impactos das categorias de forma normalizada). Entre os resultados mais significativos do estudo estão o esgotamento de combustíveis fósseis, mudança de uso da terra e liberação de compostos inorgânicos respiráveis (devido aos fertilizantes). Os impactos mais discrepantes foram em relação esgotamento dos combustíveis fósseis (250 pontos LAS vs. 63 pontos MES), enquanto a produção de MES teve maior impacto no uso da terra (160 pontos MES vs. 2 pontos LAS) e inorgânicos respiratórios (63 pontos vs. 30 pontos LAS). A partir dos resultados deste estudo, os autores concluíram que, para as condições avaliadas, o MES é um surfactante mais ecológico devido ao maior potencial de

biodegradabilidade e por ser de fonte renovável.

A utilização de insumos advindos de fontes residuais é uma oportunidade de redução de cargas ambientais e custo de produção para biossurfactantes. O estudo de Lucchetti *et al.* (2019) objetivou demonstrar o potencial das práticas de reciclagem como um caminho de transição para uma economia mais circular e para isso fez um estudo de ACV comparativa que constatou que a utilização de óleos vegetais regenerados para a produção de sabão reduz significativamente os impactos ambientais em comparação com a utilização de óleo de coco importado de países terceiros. Desta forma, enfatiza-se a importância da utilização de matérias-primas secundárias e percepção dos impactos logísticos de insumos, sendo preferível, encontrar soluções locais e em território nacional.

Akizu-Gardoki *et al.* (2022) conduziram uma análise do ciclo de vida (ACV) focada em ecodesign para um limpador multiuso enzimático, tendo como unidade funcional 1 kg do produto e considerando os impactos ambientais do berço ao túmulo em sete categorias. Os principais contribuintes para a pegada ambiental foram identificados como desengordurante, energia e transporte. Como resposta a essas descobertas, foram sugeridos cenários de melhoria, abrangendo alterações na matriz energética, volumes, método de distribuição, tipos de embalagem e a substituição dos surfactantes, substituindo o reagente do cenário base que era o álcool etoxilado de origem petroquímica por alternativas como óleo de coco, óleo de palmiste e surfactante de origem oleoquímica. As mudanças nos aspectos de transporte e embalagem mostraram-se mais impactantes na redução da pegada ambiental do que a substituição direta do álcool etoxilado (3-butoxi-2-propanol) por biossurfactante, produzido com o uso de fertilizantes.

Briem *et al.* (2022) realizaram uma revisão sistemática utilizando 70 combinações de duas ou três *strings* de busca nas bases Scopus e Google acadêmico obtendo mais de 2.600 títulos. Após a primeira triagem, 350 títulos foram analisados por escopo e os critérios (revisão por pares e realização de ACV). Por fim, foram obtidos somente 6 artigos, dos quais 3 abordam biossurfactantes microbianos, e os outros 3 tratam de alquil poliglicosídeos (APGs), surfactantes de base biológica que, embora sejam sintetizados por processos químicos a partir de matérias-primas biológicas, não são classificados como biossurfactantes microbianos. Esses compostos não são produzidos por microorganismos e são frequentemente referidos como "biossurfactantes de primeira geração".

Quadro 7 - Estudos de biossurfactantes que utilizaram a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
Tipo de surfactante	Soforolípideo	N/A	Soforolípideos(SL) e Ramnolípideo (RL)	Soforolípideos	Soforolípideos	Ramnolípídios (RL) e Manosileritritol lipídios (MEL)
Matérias-primas	Glicose, óleo de canola	Resíduos de óleo mineral	SL: Óleo de resíduos e glicose; RL: Óleo de resíduos	Bagaço da cana de açúcar	Resíduos alimentícios	Melaço, polpa de beterraba
Escala	Industrial, para planta de 150 L/batelada	Industrial, aumentada a partir de processo de laboratório	Industrial, aumentada a partir de processo de planta piloto	Industrial, aumentada a partir do processo de laboratório e dados da literatura	Industrial, a partir de escala piloto e de simulação	Industrial, a partir de dados primários de planta piloto e a aumentada para escala industrial

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
Principais processos utilizados	Filtração Ultrafiltração Diafiltração Concentração por Evaporação Extração com Hexano Controle da Fermentação	Fermentação Filtração Homogeneização Precipitação Destilação Secagem	Produção de Sphorolipídios: Preparação do pré-inóculo e Inoculação Aumento do Inóculo Fermentação Principal Produção de Rhamnolipídios: Preparação do Pré-inóculo Formação do Inóculo Fermentação Principal	Cultivo Aeróbico Fonte de Carbono Supercalagem Recuperação do biossurfactante (BS): -Precipitação Ácida -Extração Líquido-Líquido Processo Alternativo para Recuperação do BS: -Pré-tratamento com Água Quente Líquida (LHW) -Ultrafiltração (UF)	Hidrólise Enzimática de Resíduos Alimentares Purificação do Hidrolisado Clarificação do Sobrenadante por Ultrafiltração Precultura Fermentação em Batelada Alimentada Processo de Recuperação	Produção de Rhamnolipídios (RLs): Produção e Processamento de Beterraba-Sacarina Armazenamento e Preparação Fermentação de Sementes Fermentação Principal Precipitação Recuperação do Agente de Precipitação Extração Condicionamento Final Produção de Manosileritrol lipídios (MEL): Produção e Processamento Inicial Armazenamento e Preparação Fermentação Principal Extração #1 Recuperação do Agente de Extração #1 #2 #3 Secagem e Armazenamento
Aplicação	Detergente para lavagem de mãos	Remediação de derramamentos de petróleo bruto	N/A	N/A	N/A	N/A
Referência geográfica	Bélgica	N/A	Grécia	Brasil	China	N/A

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
Extensão do sistema de produto	Do berço ao túmulo	Do portão ao portão	Do portão ao portão	Do portão ao portão	Do portão ao túmulo	Do berço ao portão
Unidade funcional	1 lavagem de mãos (2,3 g de surfactante + 0,64 L de água)	1.000 kg de surfactante	1 kg de surfactante	1 kg de surfactante	1 kg de surfactante	Produção (em massa) de surfactante necessário para atender o mesmo SCP (Desempenho de limpeza específico) de 1 kg de MEL
Software de ACV	N/A	N/A	SimaPro 7.3.3	SimaPro 9.0	SimaPro 8.5	GaBi 10.5
Base de dados	Ecoinvent 3.1	N/A	Ecoinvent 2.0	Ecoinvent 3.0	Ecoinvent 3.0	ecoinvent 3.7 + GaBi professional
Fonte de dados	Experimentais (escala piloto, 150 L)	Dados experimentais (bancada de laboratório), simulação de aumento para processo industrial	Dados experimentais (experimento piloto) + literatura	Dados experimentais (bancada de laboratório), simulação de aumento para processo industrial + literatura	Dados experimentais (experimento piloto), simulação de aumento para processo industrial + literatura	Dados experimentais (experimento piloto), simulação de aumento para processo industrial + literatura
Métodos de LCIA	ILCD midpoint v1.04, ReCiPe endpoint (Europe H/A) v1.10	N/A	EPD 2008 V1.03	CML-IA baseline V3.04 (World 2000)	ReCiPe 2016 (H); IPCC, CED	Environmental Footprint methodology EF 3.0 + normalization method

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
Categorias de impacto	<p>Midpoint: Aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, material particulado, radiação ionizante, formação de ozônio fotoquímico, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, uso da terra e depleção de recursos</p> <p>Endpoint: Dano à saúde humana, ecossistemas e recursos.</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, acidificação, eutrofização.</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, potencial de acidificação, eutrofização, demanda de energia fóssil não renovável.</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, destruição da camada de ozônio, destruição abiótica, toxicidade humana global, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, Demanda acumulativa de energia, destruição da camada de ozônio, destruição abiótica, toxicidade humana global, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. Endpoint: Dano à saúde humana, ecossistemas e recursos.</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, criação de ozônio fotoquímico, eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, formação de material particulado, radiação ionizante, uso do solo, consumo de água, depleção de recursos.</p>

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
Principais conclusões	<p>Biossurfactantes glicolipídicos fermentativos são alternativas aos surfactantes petroquímicos limitados por falta de controle estrutural e disponibilidade de congêneres específicos. O aSL-COOH (T21) é não tóxico, inibindo crescimento bacteriano e formação de biofilme, especialmente em cepas Gram positivas. Os lipídios de sophorolípido ácido (aSL-COOH T21) têm estabilização de emulsões O/W limitada, mas exibem boa formação de espuma e solubilização. A análise de ciclo de</p>	<p>A ACV apresenta que a produção de biossurfactante não apresentou altos índices de impactos ambientais. No entanto, a fonte de energia do gás natural foi o principal fator ambiental. É necessário descrever o real objetivo da fabricação do surfactante, se o objetivo for a biorremediação ambiental, seria lógico colocar os organismos diretamente no solo. uma vez que possuem a capacidade de produzir exopolímeros que possuem atividades tensoativas, bem como aumentar a fertilidade do solo. Por outro lado, quando se trata da produção de biossurfactante, a utilização da energia hidrelétrica</p>	<p>O estudo revelou que as emissões atmosféricas, eletricidade e requisitos térmicos, durante a sua produção, são os principais contribuintes para os potenciais impactos ambientais identificados neste LCIA. Dentre os processos de produção de biossurfactantes, a produção de soforolipídios resultou em um impacto ambiental 22,7% maior em comparação com a produção de ramnolipídios. Da mesma forma, a produção de FAEE pode ser classificada como um processo mais ecológico em comparação com a produção de MAG, resultando em um impacto ambiental 67% menor com base nos indicadores ambientais</p>	<p>Dois processos foram propostos para produzir biossurfactantes do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando viabilidade econômica e pegada ambiental em uma usina integrada com produção de etanol 1G. Ambos os processos mostraram desempenho econômico positivo, com a segunda opção (pré-tratamento LHW sem detoxificação e ultrafiltração dupla no bagaço de cana) superior em termos econômicos e ambientais. A análise de sensibilidade e incerteza revelou</p>	<p>O estudo preliminar (Hu et al., 2021) selecionou matérias-primas de primeira e segunda geração para produzir 1 g L-1 de SL. Identificou-se que o resíduo de alimentos é a fonte mais vantajosa. A otimização da fermentação por lotes de resíduos alimentares resultou na produção de 1 kg de SLs brutos, considerada a opção mais sustentável. No entanto, a avaliação e otimização da produção em escala piloto enfrentaram desafios devido à falta de dados e</p>	<p>Este estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) analisa os benefícios ambientais da produção de biossurfactantes RL e MEL a partir de melaço e polpa de beterraba sacarina em comparação com surfactantes convencionais. Os estágios cruciais incluem a fermentação e a produção/processamento da beterraba. O tratamento de resíduos, fornecimento de ar comprimido e produção de fertilizantes são etapas essenciais. A recuperação de precipitação (RL) e extração processo #1 (MEL) têm maiores impactos, impulsionados principalmente pelo suprimento de agentes. As categorias de impacto mais relevantes são "Uso de recursos, fósseis" (maior contribuição RL), "Ecotoxicidade, água doce - total" (maior contribuição MEL) e "Mudanças climáticas - total". O foco no produto alvo é crucial, com MEL mostrando menores impactos que RL. O uso de melaço tem menor efeito, mas a escolha do substrato não influencia muito. A produção de biossurfactantes é competitiva e pode ser reforçada com avanços tecnológicos. Melhorias como aeração, uso de resíduos e reciclagem de agentes são importantes. Esses resultados indicam que a ACV apoia a viabilidade ambiental dos processos inovadores de produção de biossurfactantes RL e MEL como substitutos dos surfactantes tradicionais.</p>

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
	<p>vida revela impacto ambiental similar a surfactantes químicos, com influência majoritária devido ao uso de óleo de colza e glicose. Otimização da eficiência de conversão e proporção de glicose/óleo de colza são cruciais para redução do impacto. Além disso, análise final demonstra desempenho comparável a maioria dos produtos, exceto o LAS, com potencial mitigação por meio de matérias-primas de segunda geração e aumento da eficiência no processo de produção e purificação.</p>	<p>deve ser levada em consideração, pois o fornecimento de eletricidade foi a principal fonte de poluição.</p>	<p>avaliados. Os impactos ambientais devido ao consumo de energia de todos os processos estudados podem ser mitigados com o uso de fontes de energia renováveis para diminuir a pegada ambiental. Uma análise mais aprofundada de seu desempenho ambiental e trabalho futuro potencial poderia estender o estudo para incluir toda a análise do berço ao túmulo com base em dados derivados de uma planta de produção em grande escala.</p>	<p>que o segundo cenário tinha 59,7% de probabilidade de alcançar preço mínimo de venda de biossurfactante abaixo de 20 \$/kg, destacando sua vantagem econômica. Variáveis de processo críticas incluem tempo de reação, volume do biorreator e concentração final de biossurfactante em ambos os casos. Para o segundo cenário, o tempo e volume do reator de pré-tratamento, fluxo de ultrafiltração e operação da membrana são relevantes. Essas considerações destacam a necessidade de otimizar aspectos</p>	<p>informações de processamento em escala laboratorial. Melhorias na recuperação do SL refinado são necessárias em escala industrial antes da comercialização, considerando implicações ambientais e financeiras. A terceira etapa, desenvolvida nesse artigo, envolveu um ciclo de vida dinâmico (dLCA) da produção de sofrolípidios a partir de resíduos alimentares em escala industrial, revelando que a fermentação descontínua alimentada era a etapa mais prejudicial.</p>	

Características	Estudos de Avaliação de Ciclo de vida em biossurfactantes					
	Baccile et al. (2017)	Aru e Ikechukwu (2018)	Kopsahelis et al. (2018)	Elias et al. (2021)	Hu et al. (2021)	Schonhoff et al. (2022)
				econômicos e ambientais na produção de biossurfactantes a partir do bagaço de cana-de-açúcar.	Uma análise combinada de ACV e análise técnico-econômica explorou vias de produção de cristais e xarope de SL, indicando que os cristais SL têm maiores impactos ambientais e custos totais, enquanto o xarope SL é mais adequado para aplicações com requisitos menos rigorosos de toxicidade e pureza.	

Fonte: Elaboração do autor.

O Quadro 7 resume estudos de ACV da literatura consultada, destacando informações como: tipo de surfactante, matéria-prima utilizada, escala do estudo, principais processos, aplicação, referência geográfica, escopo da ACV, unidade funcional, software, base de dados, fonte dos dados utilizados, métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida e categorias de impacto e as principais conclusões.

Não foi encontrado na literatura algum artigo de revisão por pares que realizou um estudo de ACV com biossurfactantes lipopeptídeos. Recentemente, foi publicado um trabalho de conclusão de curso que objetivou realizar uma ACV da produção de surfactina produzida pela *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 utilizando melaço de cana como substrato em escala laboratorial. Entretanto, a produção de 1 kg de surfactina resultou em um potencial de aquecimento global de $3,93 \times 10^5$ kg de CO₂ equivalente (SILVA, 2023), valor muito alto em relação a ordem de grandeza dos demais resultados já realizados de biossurfactantes. Embora a análise de Silva (2023) não considere uma metodologia estruturada para a quantificação de impactos ambientais, o senso comum leva a crer que existe uma redução de impacto ambiental no biossurfactante.

Diante do exposto, fica evidenciado que os biossurfactantes são frequentemente considerados opções ecologicamente amigáveis, devido à sua utilização de recursos naturais biológicos e renováveis, sem a fundamentação de uma avaliação ambiental quantitativa robusta. É importante ressaltar que a utilização de fontes renováveis não garante a sustentabilidade, visto que as utilidades (água, ar e energia), os insumos e os processos dos biossurfactantes são distintos daqueles dos surfactantes sintéticos e repletos de peculiaridades. Nesse ponto, a Avaliação de Ciclo de Vida se apresenta como uma ferramenta relevante para destacar potenciais impactos ambientais, a exemplo da lacuna de pesquisa de ACV de surfactantes microbianos da classe dos lipopeptídeos (BRIEM *et al.*, 2022). Este diagnóstico explicita a novidade da proposta desta tese de ACV da produção de surfactina para uma escala industrial.

O estudo de Baccile *et al.* (2017), destaca a produção microbiana de biossurfactantes como alternativa promissora aos derivados de petróleo, devido à baixa toxicidade, alta biodegradabilidade e processos biológicos a partir de recursos renováveis. Apesar das limitações globais, como baixas produtividades e poucas estruturas químicas disponíveis, o estudo descreve um método escalável de produção de sofrolipídeos 100 % ácidos, alcançando 138 g/L. A análise do ciclo de vida revela impacto ambiental semelhante aos surfactantes químicos derivados de recursos fósseis, a utilização de óleo de colza e glicose como substratos é a principal razão para os

resultados, com uma contribuição combinada de 78 % da pontuação total do ponto final em termos de danos aos ecossistemas e danos aos recursos. Outro fator relevante de impacto é o consumo de eletricidade ao longo da cadeia (15 %). A otimização da eficiência de conversão e da proporção glicose e óleo de colza detém o potencial de melhoria mais importante. Além disso, análise final demonstra um desempenho comparável para a maioria dos produtos, exceto para o LAS, com potencial mitigação por meio de matérias-primas de segunda geração e aumento da eficiência no processo de produção e purificação.

Já no estudo de Aru e Ikechukwu (2018), os autores afirmam que a ACV da produção do biossurfactante não apresentou altos índices de impactos ambientais. No entanto, a fonte de energia do gás natural foi o principal fator ambiental. Acrescenta-se ainda que é necessário descrever o objetivo da fabricação do surfactante. Quando o objetivo é a biorremediação ambiental, é lógico colocar os organismos diretamente no solo, uma vez que possuem a capacidade de produzir exopolímeros que possuem atividades tensoativas, bem como aumentar a fertilidade do solo. Por outro lado, quando se trata da produção de biossurfactante, a utilização da energia hidrelétrica deve ser levada em consideração, pois o fornecimento de eletricidade foi a principal contribuição de impacto ambiental.

Os autores Kopsahelis *et al.* (2018) concluíram que as emissões atmosféricas, eletricidade e calor, durante a produção dos tensoativos: sofrólipídeos, ramnolipídeos, ésteres etílicos de ácidos graxos (FAEE) e monoglicerídeos (MAG), são os principais contribuintes para os potenciais impactos ambientais da ACV. Dentre os biossurfactantes, a produção de sofrólipídios resultou em um impacto ambiental 22,7 % maior em comparação com a produção de ramnolipídios nas categorias de potencial de aquecimento global, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, acidificação, eutrofização e energia fóssil. Os autores destacam ainda, que a produção de FAEE pode ser classificada como um processo mais ecológico em comparação com a produção de MAG, resultando em um impacto ambiental 67 % menor com base nos indicadores ambientais avaliados (os mesmos já citados). Os impactos ambientais devido ao consumo de energia dos processos estudados podem ser mitigados com o uso de fontes de energia renováveis para diminuir a pegada ambiental. Uma análise mais aprofundada de seu desempenho ambiental deve estender a fronteira do estudo

para abranger a análise do berço ao túmulo com base em dados derivados de uma planta de produção em grande escala.

Elias *et al.* (2021) avaliaram dois processos distintos de produção de biossurfactantes a partir do bagaço de cana-de-açúcar, verificando viabilidade econômica e pegada ambiental em uma usina integrada com produção de etanol. Ambos os processos mostraram um desempenho econômico favorável, com a segunda opção (pré-tratamento líquido com água quente -LHW- sem detoxificação e ultrafiltração dupla no bagaço de cana) superior em termos econômicos e ambientais. A análise de sensibilidade e incerteza revelou que o segundo cenário tinha 59,7 % de probabilidade de alcançar preço mínimo de venda de biossurfactante abaixo de 20 US\$/kg, destacando sua vantagem econômica. Nesse cenário, o tempo e volume do reator de pré-tratamento, fluxo de ultrafiltração e operação da membrana são relevantes, o que destaca a necessidade de otimizar aspectos econômicos e ambientais na produção de biossurfactantes a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

O estudo preliminar desenvolvido por Hu *et al.* (2021) selecionou matérias-primas de primeira e segunda geração para produzir 1 g/L de sofrorolipídeos (SL) e identificou que os resíduos alimentícios se mostraram como a fonte mais vantajosa. No entanto, a avaliação e otimização da produção em escala piloto enfrentaram desafios devido à falta de dados e informações de processamento em escala laboratorial. O estudo posterior de Hu *et al.* (2021a) envolveu uma avaliação ciclo de vida dinâmica (dLCA) da produção de sofrorolipídios a partir de resíduos alimentares em escala industrial, revelando que a fermentação com alimentação descontínua era a etapa mais prejudicial. Ainda sobre esse estudo, análise combinada de ACV e análise técnico-econômica explorou vias de produção de cristais e xarope de SL, indicando que os cristais SL têm maiores impactos ambientais e custos totais, enquanto o xarope SL é mais adequado para aplicações com requisitos menos rigorosos de toxicidade e pureza.

Por fim, o estudo de Schonhoff *et al.* (2022) é uma ACV que compara os impactos ambientais da produção de rhamnolipídios (RL) e Manosileritritol lipídios (MEL), a partir de melaço e polpa de beterraba sacarina respectivamente, aos surfactantes convencionais. A recuperação de precipitação do RL e primeira extração do MEL têm maiores impactos nas categorias avaliadas, impulsionados principalmente pelos insumos envolvidos. As categorias de impacto mais relevantes são: para o RL, "Uso de recursos, fósseis", e para o MEL, "Ecotoxicidade, água doce - total" e

"Mudanças climáticas – total". O MEL apresenta menores impactos que o RL em que o uso de melão tem menor efeito, no entanto, a escolha do substrato não influenciou muito. O estudo concluiu que a produção de biossurfactantes é competitiva e pode ser reforçada com avanços tecnológicos, necessitando de melhorias em aeração, uso de resíduos e reciclagem de insumos. Destaca-se no estudo que a ACV apoia a identificação da viabilidade ambiental dos processos inovadores de produção de biossurfactantes RL e MEL como substitutos dos surfactantes sintéticos.

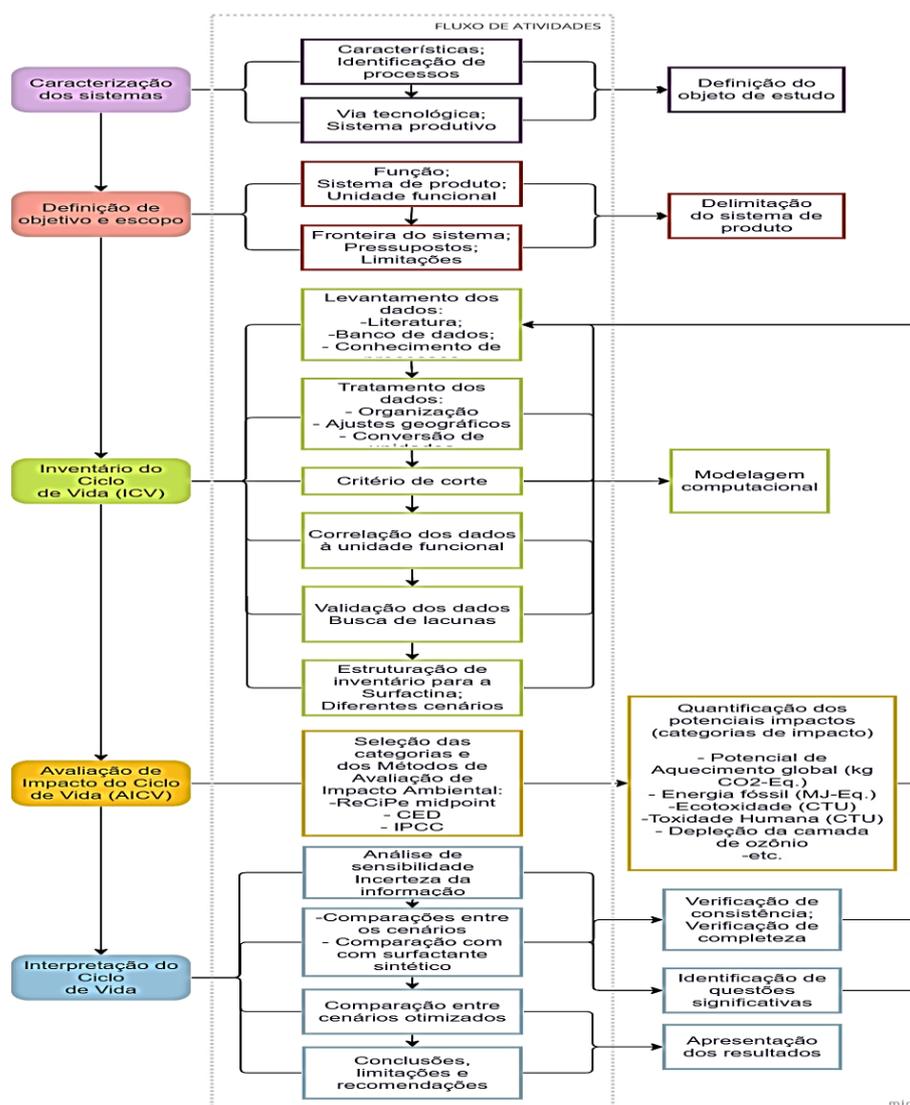
Na próxima seção serão apresentados os métodos, definições e parâmetros utilizados para a determinação dos cenários avaliados, bem como os critérios para avaliar o ciclo de vida destes cenários.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

Para o estudo de um biossurfactante utilizando a ACV para cenários com tecnologias de produção distintas, após a caracterização dos sistemas, a metodologia adotada foi sequenciada em quatro fases, sendo elas: definição do objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação, de acordo com as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, 2009b).

Figura 11 - Fluxo de atividades para a ACV da Surfactina.



Fonte: Elaboração do autor.

A Figura 11 apresenta as etapas do procedimento metodológico para cada fase

da ACV.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS EM ESTUDO

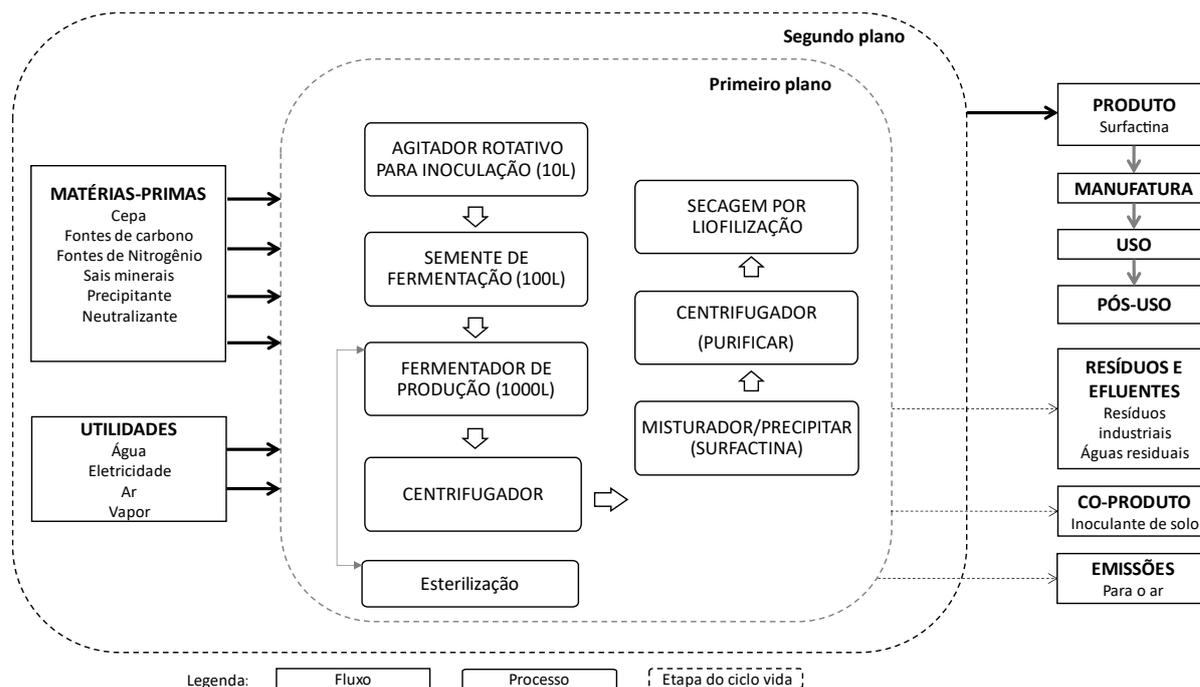
A caracterização dos sistemas permite que haja coerência entre o processo avaliado pela metodologia e os sistemas reais de produção estudados. Foram levantados aspectos das tecnologias de produção consideradas no estudo e outras informações relevantes em estudos semelhantes da literatura consultada para que esse estudo pudesse ter comparabilidade com estudos da literatura.

A definição dos processos modelados de produção de surfactina foi baseada nas tecnologias mais descritas na literatura para os processos de produção e purificação. Dada a ausência de produção comercial no Brasil, não foi possível obtenção de dados primários, foram selecionados na literatura diferentes trabalhos experimentais de produção de surfactina publicados em revistas com revisão por pares, buscando avaliar as diferentes condições experimentais e de escala de produção, clareza das informações, tipo de cultura, tipo de substrato utilizado e relação entre as diferentes fontes de carbono e nitrogênio, assim como suas proporções. As concentrações de surfactina no meio de cultivo (medida em g/L) variam de acordo com cada literatura consultado.

Tendo em vista que não foram encontrados dados de produção em escala industrial para a surfactina, os dados obtidos na literatura consultada foram projetados para uma produção em escala industrial. Foi considerado um aumento volumétrico em 3 estágios, conforme proposto por Czinkóczy e Németh (2020a), iniciando com um frasco de agitação, resultando em 10 litros de caldo de fermentação, seguido por uma semente de fermentação de 100 litros e um fermentador de produção para 1000 litros de meio de cultivo. A esterilização foi considerada por meio de vapor, conforme descrito nos estudos de produção em larga escala de biosurfactantes de Elias *et al.* (2021) e Schonhoff *et al.* (2022), mantendo-se os equipamentos a 121° C durante 1 h. A tecnologia de produção considerada foi a de fermentação aerada seguida de centrifugação com coletor de espuma (BARROS; PONEZI; PASTORE, 2008; WILLENBACHER *et al.*, 2014; ALONSO; MARTIN, 2016; MAGALHÃES, 2019; CZINKÓCZKY; NÉMETH, 2020a), precipitação ácida com HCl e neutralização com NaOH (JOSHI *et*

al., 2015; CZINKÓCZKY; NÉMETH, 2020b) e liofilização (CZINKÓCZKY; NÉMETH, 2020b; HU *et al.*, 2022) como etapa final. A Figura 12 descreve as etapas do ciclo de vida e processos da produção da surfactina em escala industrial para este estudo, considerando os fluxos de entrada de saída.

Figura 12 - Sistema de produto da produção de surfactina.



Nota: O dióxido de carbono formado na fermentação, assim como outras substâncias, foram desconsideradas nas emissões para o a.

Fonte: Elaboração do autor.

3.3 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E DO ESCOPO

Objetivo: Avaliar o desempenho ambiental dos diferentes cenários de produção da surfactina por meio da identificação dos aspectos e análise dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida para comparar os potenciais impactos ambientais com os de outros surfactantes e sugerir propostas de melhorias para os cenários avaliados.

Escopo: Os sistemas estudados são processos produtivos industriais adaptados para representar diferentes cenários de produção.

Limite do sistema: Os limites do sistema são do berço ao portão (*cradle-to-gate*) e estão representados na Figura 12. As etapas do ciclo de vida a partir da distribuição do produto, tais como uso e pós-uso, não fazem parte da fronteira considerada nesta

pesquisa. Os dados utilizados para a surfactina são secundários, baseados em dados experimentais, de 1 litro de meio fermentativo, obtidos na literatura e projetados para uma produção em escala industrial.

No estudo foi utilizado uma unidade declarada de surfactina, não foi utilizada uma unidade funcional porque as comparações com outros surfactantes foram realizadas por proporção mássica, sendo necessário frisar que as mesmas proporções de diferentes produtos podem desempenhar funções saneantes distintas. A unidade declarada no estudo é de 1kg surfactina, o sistema de produto corresponde a produção de 1 kg de surfactina liofilizada com 89 % de pureza em base mássica, em um contexto de produção industrial. As principais diferenças da produção de surfactina dos cenários avaliados são o tipo de substrato, a concentração de surfactina produzida e a eficiência de conversão de substrato em surfactina (Tabela 3).

Tabela 3 - Dados experimentais de laboratório da produção de surfactina obtidos na literatura.

DADOS EXPERIMENTAIS	(C1) Yeh (2006)	(C2) Amani (2010)	(C3) Pereira (2013)	(C4) Willenbacher (2014)	(C5) Czinkóczy (2020b)	(C6) França et al. (2021)	(C7) Janek et al. (2021)
Substrato	Glicose	Sacarose	Sacarose	Glicose	Glicose	Sacarose	Glicerol residual
Quant. (g)	40,00	9,70	10,00	40,00	34,00	16,55	40,00
Concentração de surfactina (g/l)	6,45	2,50	0,84	3,99	4,99	0,92	2,80

DADOS EXPERIMENTAIS	(C1) Yeh (2006)	(C2) Amani (2010)	(C3) Pereira (2013)	(C4) Willenbacher (2014)	(C5) Czinkóczy (2020b)	(C6) França et al. (2021)	(C7) Janek et al. (2021)
Conversão	16 %	26 %	8 %	10 %	15 %	6 %	7 %
Microorganismo	<i>B. subtilis</i> ATCC 21332	<i>B. subtilis</i>	<i>B. subtilis</i> #309	<i>B. subtilis</i> DSM 10T	<i>B. subtilis</i> DSM10	<i>Bacillus subtilis</i> LAM1005	<i>B. subtilis</i> #309

Fonte: Elaboração do autor

A construção dos cenários propostos sugere uma projeção dos dados da literatura para a produção industrial com aumento volumétrico em três estágios. A fase líquida é conduzida para a centrífuga de pilha de disco para separar as células do caldo, posteriormente o sobrenadante, livre de células, é acidificado e deixado para precipitar. Após esse processo, o caldo fermentado segue para o centrifugador de tigela que coleta o precipitado. A biomassa sedimentada é estabilizada e vira um co-produto e o precipitado coletado é neutralizado e segue para a etapa final de secagem por pulverização, resultando na produção da surfactina 89 % purificada.

O estudo que corresponde a utilização de matéria-prima residual (glicerol) como fonte de carbono do sistema (Tabela 3) foi escolhido devido a sua maior concentração de surfactina, quando comparado com outros estudos realizados com fontes residuais (MOSHTAGH, HAWBOLDT, ZHANG, 2018; ROCHA et., 2021). Outros estudos utilizaram fontes residuais e obtiveram baixas concentrações como: resíduo de caju apresentou 0,175 g/L (DE OLIVEIRA et al., 2013), resíduo do processo de óleo de colza e girassol 1,450 g/L (CIURKO et al. 2022).

No entanto, o uso de fontes residuais não está isento de desafios, particularmente na etapa crítica de recuperação e purificação. O estabelecimento de um meio propício para a produção de biossurfactantes já é intrinsecamente complexo, considerando as variadas demandas nutricionais de microrganismos específicos e a necessidade de alinhar o design do meio com as vias metabólicas particulares de cada organismo (NURFARAHIN; MOHAMED; PHANG, 2018). Além disso, as dificuldades

acentuam-se no processamento *downstream*, onde insumos de alto custo são necessários para métodos complexos de recuperação, envolvendo processos como precipitação, cristalização, centrifugação e fracionamento de espuma. A busca por alternativas de recuperação mais eficientes e economicamente viáveis para os biossurfactantes torna-se, portanto, uma prioridade crescente (BANAT *et al.*, 2014).

3.4 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

Esta fase é crucial nos estudos de ACV devido ao grande volume de dados, dificuldade de obtenção, tratamento de dados, estimativas e justificativas sobre obtenção ou o não atendimento dos requisitos de qualidade, o que onera os pesquisadores em relação aos recursos envolvidos (NBR, 2009b). No inventário, os dados de entrada e saída são referentes à produção em escala industrial de 1 kg de surfactina em pó purificada (89 %), dado que, para os diferentes cenários, devido as variadas composições do meio fermentativo, as concentrações de surfactina são diferentes, apresentando diferentes eficiências de conversão.

O inventário proposto para a surfactina é uma projeção de dados experimentais de laboratório como a composição do meio fermentativo e fator de conversão em surfactina, publicados em artigos, para uma escala industrial por meio de uma unidade fabril com capacidade de 1000 litros de fermentado por batelada de produção. As utilidades (ar, água e eletricidade) e quantitativos médios dos insumos de precipitação e neutralização foram baseados no estudo de Czinkóczy e Németh (2020a) que simulou uma produção de surfactina e linqensina para 1000 litros de fermentado por meio do SuperPro Designer 9.5[®], considerando a escala de produção anual de 18,2 toneladas. A quantidade de água de cada cenário foi ajustada para complementar o volume do reator. Os quantitativos de acidificante e neutralizante foram atribuídos na mesma proporção entre os cenários, assim como o ar utilizado para aeração. O consumo de eletricidade considerada nos diferentes cenários foi baseado no consumo de eletricidade específica de aproximadamente 588 kWh por batelada de 1000 L de fermentado, proposto por Czinkóczy e Németh (2020a).

Considerando o processo produtivo descrito na Figura 12, foi apontada uma distribuição desse consumo de eletricidade por etapas do processo, pautada nos tipos

de equipamentos envolvidos nos processos, bem como, suas respectivas potências e quantidade de uso dos equipamentos. Portanto, estimou-se que a utilização do agitador rotativo para inoculação é responsável por 2 % desse consumo, o fermentador por 44 %, a primeira centrifugação por pilha de disco representa 15 %, a segunda centrifugação por tigelas 11 %, a liofilização representa 18 % e esterilização 10 % do consumo total.

A quantidade da cepa utilizada não foi considerada nos inventários, sendo que esse fator de corte (*cut-off*) diz respeito a pequena quantidade seca da cepa (5 g/L) na etapa da inoculação (CZINKÓCZKY; NÉMETH, 2020a).

Figura 13 - Insumos e utilidades da operação que compõem os inventários de primeiro plano dos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina em pó (89 %).

INVENTÁRIO	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Grau de incerteza
INSUMOS E UTILIDADES (kg)	CONSUMO	σ_g						
Glicose	6,20E+00	-	-	1,00E+01	6,81E+00	8,91E+00	-	1,36E+00
Sacarose	-	3,88E+00	1,18E+01	-	-	8,91E+00	-	1,36E+00
Melaço de cana	-	-	-	-	-	-	-	1,36E+00
Glicerol (Resíduo de sabão)	-	-	-	-	-	-	1,43E+01	1,36E+00
NH ₄ NO ₃ (Nitrato de amônio)	6,20E-01	-	2,37E+00	-	2,00E-01	-	1,43E+00	1,36E+00
NH ₄ Cl (Cloreto de amônio)	-	-	-	1,34E+00	0,00E+00	-	-	1,36E+00
AlK(SO ₄) ₂ (Alúmen de potássio)	-	1,20E-04	0,00E+00	-	-	-	-	1,36E+00
KH ₂ PO ₄ (Dihidrogenofosfato de potássio)	6,33E-01	1,05E+00	2,37E+00	1,02E+00	1,20E+00	3,23E+00	7,14E-01	1,36E+00
K ₂ HPO ₄ (Fosfato dipotássico)	-	5,39E+00	-	-	-	-	-	1,36E+00
Na ₂ HPO ₄ (Hidrogenofosfato de sódio)	6,60E-01	-	5,92E+00	1,42E+00	5,41E-01	6,46E+00	1,79E+00	1,36E+00
Na ₂ MoO ₄ *2H ₂ O (Molibdato de sódio)	-	1,20E-04	-	-	-	-	-	1,36E+00
Na ₂ SeO ₄ (Selenato de sódio)	-	6,00E-05	-	-	-	-	-	1,36E+00
NaCl (Cloreto de sódio)	-	1,94E+01	1,18E+01	-	-	-	-	1,36E+00
NaNO ₃ (Nitrato de sódio)	-	3,88E-01	-	-	-	-	-	1,36E+00
NiCl ₂ *6H ₂ O (Cloreto de Níquel II)	-	3,60E-04	-	-	-	-	-	1,36E+00
MgSO ₄ (Sulfato de magnésio)	-	3,00E-01	-	2,41E-02	-	-	-	1,36E+00
MgSO ₄ *7H ₂ O (Sulfato de magnésio)	3,06E-02	-	2,37E-01	-	2,00E-02	-	7,14E-02	1,36E+00
Mg ₂ SO ₄ *7H ₂ O	-	-	-	-	-	6,46E-01	-	1,36E+00
H ₃ BO ₃ (Ácido bórico)	-	1,20E-04	-	-	-	-	-	1,36E+00
CaCl ₂ (Cloreto de cálcio)	1,20E-04	-	-	1,93E-04	2,40E-04	-	-	1,36E+00
CuSO ₄ *5H ₂ O (Sulfato de Cobre II)	-	1,20E-04	-	-	-	-	-	1,36E+00
FeSO ₄ (Sulfato de ferro II)	-	-	-	1,52E-04	-	-	-	1,36E+00
FeSO ₄ *7H ₂ O (Sulfato de ferro II)	8,62E-02	1,20E-03	-	-	3,31E-04	-	-	1,36E+00
MnSO ₄ (Sulfato de manganês)	-	-	-	3,78E-05	-	-	-	1,36E+00
MnSO ₄ *4H ₂ O (Sulfato de manganês)	-	3,60E-02	-	-	3,01E-04	-	-	1,36E+00
Na-EDTA (Sal Dissódico de EDTA)	2,31E-04	6,00E-03	-	-	4,41E-04	-	-	1,36E+00
Na ₂ -EDTA (Dissódico de EDTA)	-	-	-	3,73E-04	-	-	-	1,36E+00
ZnSO ₄ *7H ₂ O (Sulfato de zinco)	-	1,20E-03	-	-	-	-	-	1,36E+00
Levedura	-	1,94E-01	-	-	1,00E-01	-	-	1,36E+00
Água*	1,47E+02	3,68E+02	1,15E+03	2,37E+02	1,92E+02	1,05E+03	3,39E+02	1,36E+00
HCl (Ácido clorídrico)	1,00E-02	1,36E+00						
NaOH (Cloreto de sódio)	9,10E-04	1,36E+00						
Ar (m ³)	1,16E+02	3,00E+02	8,89E+02	1,88E+02	1,50E+02	8,07E+02	2,68E+02	1,26E+00
Vapor (kg)	3,10E+00	8,00E+00	2,37E+01	5,01E+00	4,01E+00	2,15E+01	7,14E+00	1,26E+00
Elettricidade (kWh)	9,12E+01	2,35E+02	6,97E+02	1,47E+02	1,18E+02	6,33E+02	2,10E+02	1,26E+00

Dados experimentais de referência:

C1: Yeh (2006)

C2:Amani (2010)

C3:Pereira (2013)

C4: Willenbacher (2014)

C5:Czinkóczy (2020)b

C6:França et al. (2021)

C7: Janek et al. (2021)

HCl, NaOH, Ar e Elettricidade: Czinkóczy (2020)a

Vapor: Elias et al. (2021)

*A quantidade foi ajustada para complementar o reator (1000L)

Nota: Foi utilizado o critério de corte que desconsidera a carga ambiental do fornecimento de insumo de fonte residual

Fontes de nitrogênio

Fontes de carbono

Demais componentes

Foram construídos os inventários contemplando sete cenários base (C1-C7), considerando diferentes formulações do meio fermentativo e concentrações de surfactina para a produção de surfactina em escala industrial. A Figura 13 apresenta os quantitativos dos insumos e utilidades utilizadas em cada cenário. As demais informações que complementam o inventário estão disponíveis no Apêndice B, no qual são apresentados os inventários de primeiro plano para cada cenário com os nomes dos fornecedores de segundo plano.

Referente ao grau de incerteza obtido a partir da Matriz Pedigree, para abranger todos os cenários, foi considerado uma correlação temporal de uma forma mais conservadora (+15 anos). Ao passo que, se fosse considerado o dado mais recente para todos os cenários, haveria alteração de 1,84 para 1,58 na pontuação do indicador.

Os inventários de segundo plano foram obtidos nos *datasets* disponíveis na base de dados *Ecoinvent 3.8* para os fornecimentos dos insumos e utilidades. Foram considerados conjuntos de dados de mercado (*market*), os quais incluem o a cadeia de produção e transporte médio até o local de uso. Para o fornecimento do açúcar foi contabilizado os impactos do fornecedor “*sugarcane processing, traditional annexed plant | sugar, from sugarcane | Cutoff, U – BR*” juntamente com o transporte contabilizado para o fornecedor “*market for sugar, from sugarcane | sugar, from sugarcane | Cutoff, U – GLO*”. Para o fornecimento de vapor foi considerado o fornecedor “*steam production, in chemical industry | steam, in chemical industry | Cutoff, U – RoW*”. A determinação das prioridades de fornecimento de dados que compuseram os inventários de segundo plano seguiu uma abordagem que prioriza a utilização de informações de contexto brasileiro (BR). Na ausência desses dados, foi recorrido aos dados de contexto global (GLO). Em situações em que não foi possível obter dados para contexto global, optou-se por utilizar dados do resto do mundo (RoW). Ressalta-se que a categoria RoW engloba dados que representam o Brasil, desconsiderando especificidades geográficas do país (Apêndice B).

3.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Devido à inexistência de instalações industriais no Brasil dedicadas à produção de surfactina, este estudo baseou-se em dados experimentais de laboratório, simulações em escala industrial e informações obtidas na literatura para o inventário de primeiro plano, assim como dados secundários provenientes do banco de dados para o inventário de segundo plano (Ecoinvent 3.8). A limitação decorre da escassez de estudos que simulem ou forneçam informações otimizadas sobre a produção de surfactina em larga escala para adaptar ao contexto brasileiro. Isso é percebido na predominância das publicações sobre a produção de surfactina em escalas reduzidas.

Ademais, a ausência de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) específicos para a surfactina na literatura impede a comparação direta dos resultados obtidos com outros estudos. No entanto, para contornar essa limitação, os resultados foram comparados com dados de outros biossurfactantes disponíveis na literatura com o uso de uma unidade declarada, a qual desconsidera as diferenças entre as eficiências na etapa de uso de cada surfactante.

3.6 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Após a definição do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) com o auxílio de planilhas e uso do software *OpenLCA 2.0.0*, a etapa seguinte é de avaliação dos potenciais impactos ambientais. A Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) ocorre pela associação dos dados inventariados inseridos no software e as categorias de impacto definidas, o que permite o cálculo dos indicadores destas categorias a partir da base de dados *Ecoinvent 3.8* que compõe o inventário de segundo plano.

Tanto para os diferentes cenários da surfactina quanto para o LAS utilizado na comparação (“*market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical | alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical | Cutoff, U*”), foram adotados quatro métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) disponíveis na base de dados *Ecoinvent 3.8*. Todos os métodos utilizados neste estudo são de nível *midpoint*, classificação que utiliza indicadores de mecanismo ambiental (processos físicos, químicos e biológicos) de uma dada categoria de impacto ambiental, sem considerar os danos específicos causados (ABNT, 2009a).

Os métodos de avaliação escolhidos foram o CED, IPCC 2013, ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) e USEtox, metodologias que são amplamente utilizadas em todo o mundo. As incertezas no *midpoint* são consideradas aceitáveis (HUIJBREGTS *et al.*, 2017). As categorias de impacto consideradas foram: demanda acumulativa de energia -fóssil, potencial de aquecimento global, depleção da camada de ozônio, consumo de água, ecotoxicidade e toxicidade humana.

No Apêndice B, são apresentadas as contribuições da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) por cadeia de fornecimento de insumos e utilidades para cada cenário. No Apêndice C, se encontram as simulações Monte Carlo para determinar a propagação da incerteza do resultado, com um intervalo de confiança de 95 % e 500 iterações, utilizando-se a curva de distribuição de dados lognormal para os cenários base do modelo. A utilização de simulação de Monte Carlo para 500 iterações, o que é uma abordagem aproximada devido ao grande tempo de computação dos vários cenários, porém os resultados são semelhantes àqueles com quantidades maiores de iterações, ou seja, 1000 iterações (BIPM *et al.*, 2008).

3.7 INTERPRETAÇÃO: ANÁLISE DE CONTRIBUIÇÃO, INCERTEZA E SENSIBILIDADE

A organização dos dados foi elaborada no software de planilha *Excel* da *Microsoft* e as análises posteriores e construção dos gráficos da análise de contribuição por grupo de fluxo de inventário para as categorias avaliadas foram feitas no software *Power BI Desktop* de *business intelligence* também da *Microsoft*.

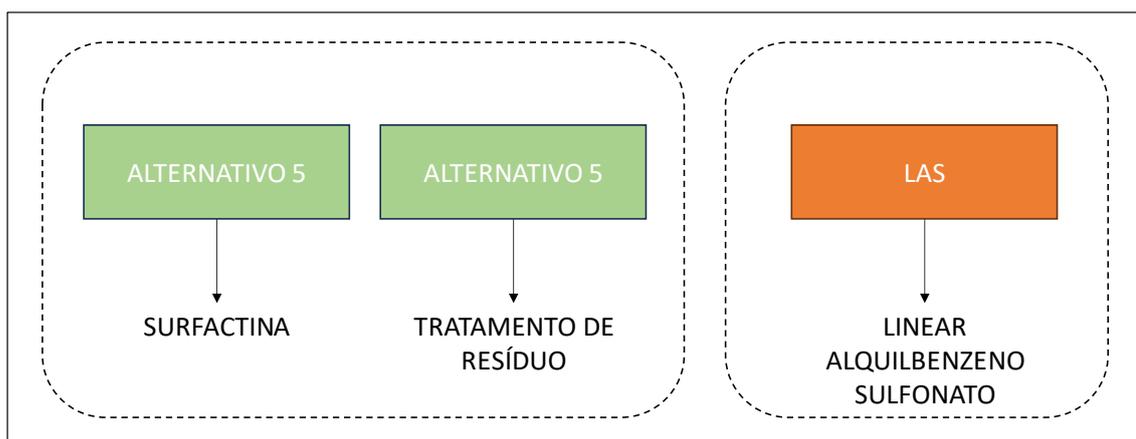
Os cenários alternativos 1, 2 e 3 foram baseados no cenário de melhor performance ambiental entre os cenários modelados. O Alternativo 1 foi elaborado com a substituição do suprimento da fonte de carbono da glicose que advinha do amido extraído da produção agroindustrial do milho (dados globais) para o açúcar advindo da produção agroindustrial da cana-de-açúcar (dados brasileiros). O Alternativo 2 foi elaborado com a substituição do fornecedor da eletricidade, que antes advinha da matriz elétrica brasileira, para o fornecimento com a matriz elétrica global para representar a produção em diferentes regiões do mundo em média. Já para o cenário Alternativo 3, houve também uma alteração da matriz elétrica, diferentemente do Alternativo 2, a substituição ocorreu no fornecimento para todas as utilidades (eletricidade, ar

comprimido e vapor) e não somente para eletricidade, e elas foram substituídas pelo de fornecimento advindo de uma usina fotovoltaica.

O cenário Alternativo 4 teve a proposta de remodelar o cenário que utiliza o glicerol residual como fonte de carbono para a produção de surfactina. Entretanto, o fator de concentração foi alterado para o mesmo que o cenário de maior coeficiente, para que pudesse haver uma comparação do impacto que uma maior concentração de surfactina, por meio fermentativo, pode exercer.

E, por fim, o cenário Alternativo 5, utiliza-se do Alternativo 4 e propõe ainda, a substituição da matriz elétrica para as utilidades (eletricidade, ar comprimido e vapor) por fornecimento de usina fotovoltaica.

Figura 14 - Sistema de produto que representa a multifuncionalidade do cenário Alternativo 5 em comparação com o LAS.



Fonte: Elaboração do autor.

Foi realizada ainda uma comparação do cenário Alternativo 5 com o surfactante sintético LAS, a Figura 14 descreve a expansão da fronteira do sistema devido a multifuncionalidade do Alternativo 5, que trata resíduo e produz surfactante em comparação ao LAS que apenas produz surfactante.

Para estimar as incertezas das informações apresentadas no inventário de primeiro plano, foi utilizada a Matriz de qualidade dos dados, também conhecida como Matriz Pedigree. Nesta matriz, os dados de inventário são avaliados por intermédio de 5 categorias (Tabela 1). Essa metodologia é utilizada em combinação à incerteza básica para calcular o desvio padrão geométrico relativo dos valores de cada fluxo de

inventário. Os desvios padrões geométricos referentes ao inventário de primeiro plano foram apresentados na Figura 13, enquanto as simulações Monte Carlo foram apresentadas no Apêndice C. No tópico a seguir são apresentados os resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV)

As proporções mássicas dos insumos (carbono, nitrogênio e demais substâncias) apresentaram uma diferença significativa entre os cenários avaliados. Desconsiderando o quantitativo de água para os meios fermentativos de 1000 L em cada cenário, as fontes de carbono contribuíram com os seguintes quantitativos mássicos no fluxo de entrada de cada cenário: C1 (75 %), C2 (12 %), C3 (34 %), C3 (72 %), C4 (77 %), C5 (61 %) e C7 (78 %). Já as fontes de nitrogênio, representaram as seguintes contribuições mássicas: C1 (8 %), C2 (4 %), C3 (7 %), C4 (10 %), C5 (2 %), C6 (4 %) e C7 (8 %). Seguindo a mesma lógica, as diferentes substâncias presentes na reação, sejam elas, sais, minerais ou leveduras, representaram as seguintes contribuições mássicas: C1 (17 %), C2 (84 %), C3 (59 %), C4 (18 %), C5 (21 %), C6 (35 %) e C7 (14 %).

Importante destacar que o C7 tem como fonte de carbono o glicerol, obtido a partir de resíduo de sabão. Outra consideração importante é que o C2 e C3 utilizaram um quantitativo menor das fontes de carbono, compensando com maior uso dos demais componentes. Os impactos destes cenários utilizando as metodologias CED, IPCC 2013, ReCiPe 2016 *Midpoint (H)* e USEtox em diferentes categorias de impacto são apresentadas a seguir.

4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

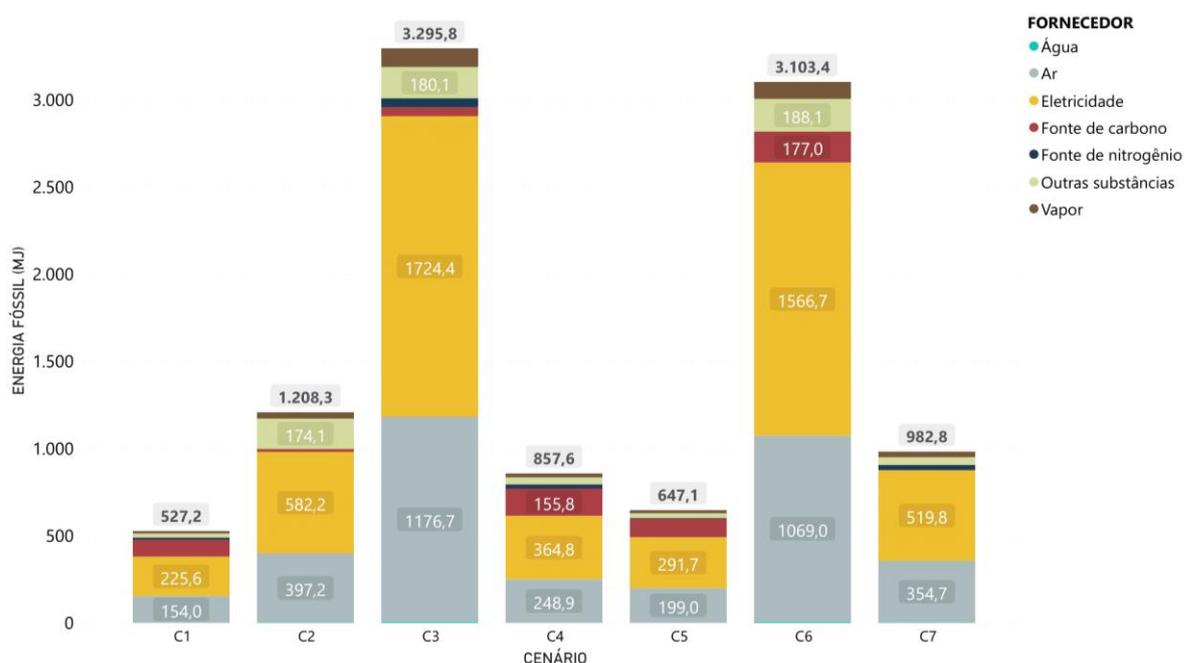
A seleção das categorias de impacto de *midpoint* avaliadas no estudo foi pautada em estudos da literatura que descreviam quais os potenciais impactos da categoria de biossurfactantes, assim como, em estudos de Avaliação de Ciclo de Vida para apoiar uma comparação dos resultados. As categorias avaliadas englobaram: energia fóssil para a demanda de energia acumulada, potencial de aquecimento global, depleção da camada de ozônio, uso de água, ecotoxicidade de água doce e toxicidade humana.

4.3 ENERGIA FÓSSIL

Esta categoria de impacto registra o esgotamento de recursos energéticos não renováveis como petróleo, gás natural e carvão. Os impactos dos cenários avaliados para essa categoria estão apresentados no Gráfico 1.

Para a categoria analisada, o C3 apresenta maior índice de esgotamento de recursos energéticos não renováveis, totalizando 3296 MJ, seguido de 3103 MJ do C6. Os cenários que apresentam menor impacto nessa categoria é o 1, com 527 MJ de consumo e C5 com 647 MJ. Os impactos mais representativos advêm das cadeias de fornecimento da eletricidade utilizada na planta industrial e do ar para aeração do processo, chegando a representar 52 % e 36 % respectivamente para o C3 (cenário de maior impacto) e 50 % e 34 % para o C6.

Gráfico 1 - Energia fóssil nos Cs avaliados de produção de 1 kg de surfactina



Fonte: Elaboração do autor.

4.3.1 Potencial de aquecimento global

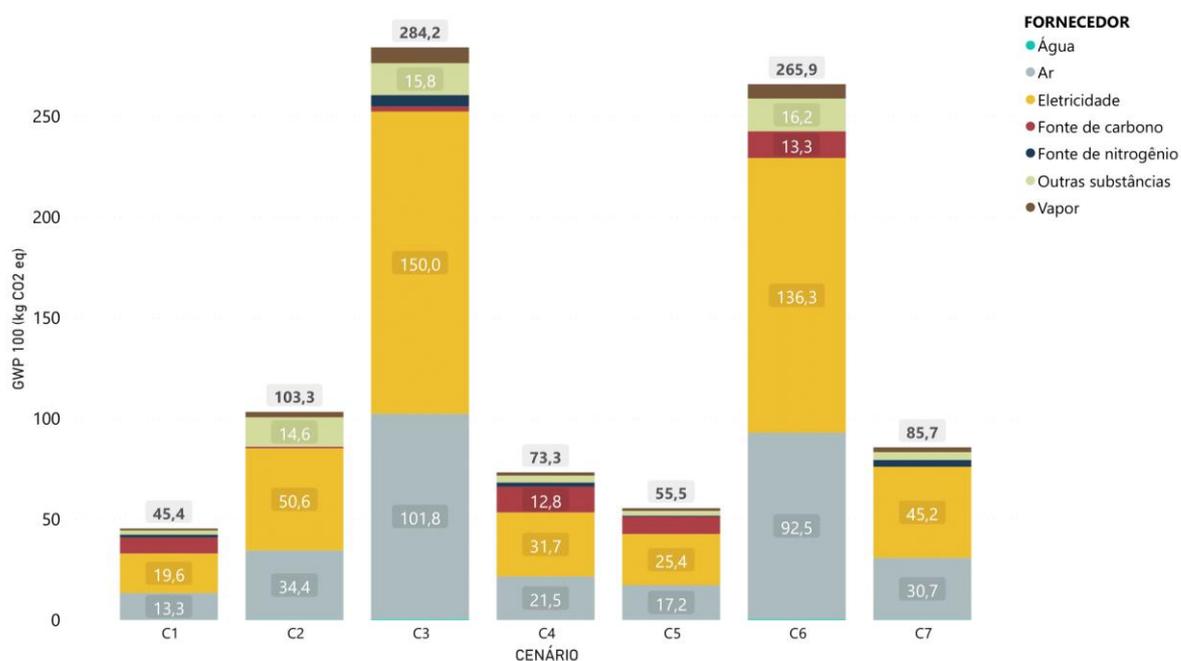
A categoria de potencial de aquecimento global, avaliado com o horizonte de tempo de 100 anos, é um indicador relacionado às mudanças climáticas, essa

categoria quantifica o impacto do potencial de aquecimento global de um determinado gás ou conjunto de gases de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono (CO₂) ao longo de 100 anos. Os impactos dos cenários para essa categoria estão apresentados no Gráfico 2.

Para o potencial de aquecimento global, o C3 apresenta maior índice de aquecimento global, totalizando 284 kg CO₂ eq., seguido de 266 kg CO₂ eq. Do C6, os cenários que apresentam menor impacto nessa categoria é o 1, com 45 kg CO₂ eq. De consumo e C2 com 56 kg CO₂ eq. A cadeia de fornecimento de eletricidade para a planta e fornecimento do ar para aeração no processo se destacam quanto aos impactos, chegando a representar 53 % e 36 % respectivamente para o C3 (cenário de maior impacto) e 51 % e 35 % para o C6.

O cenário C1 e C5 apresentam os menores quantitativos devido a mais baixa demanda de insumos de utilidades para a mesma unidade declarada de 1 kg de produto, visto que os fatores de produtividade desses cenários são os maiores.

Gráfico 2 – Potencial de aquecimento global nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina



Fonte: Elaboração do autor.

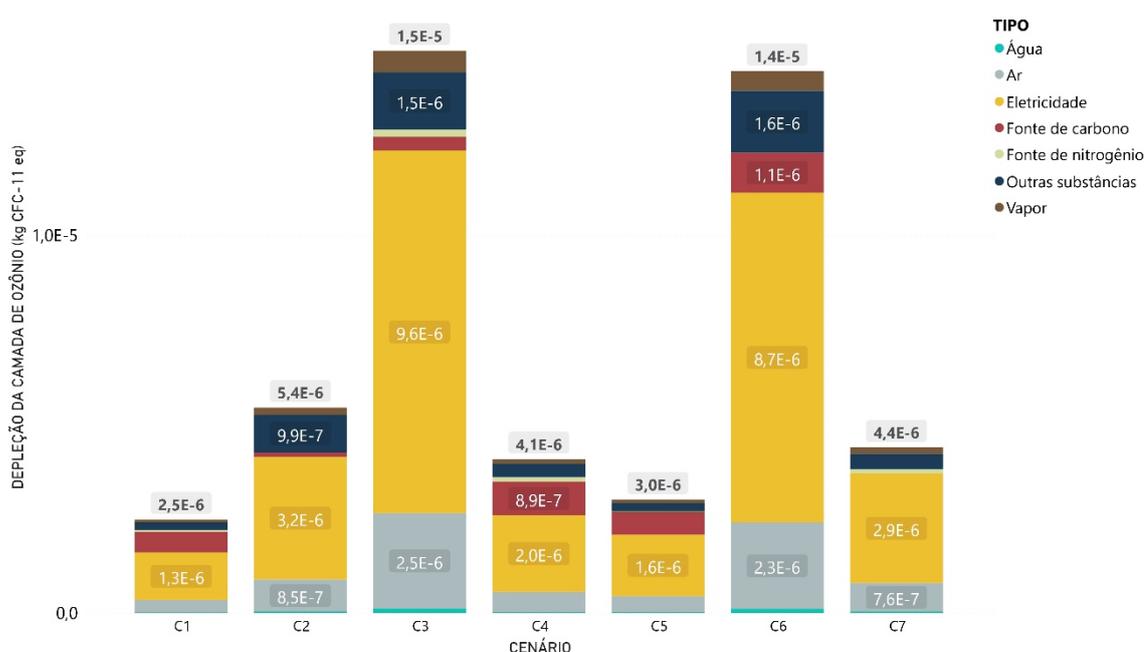
4.3.2 Depleção da camada de ozônio

A categoria de depleção da camada de ozônio, visa quantificar o impacto potencial da liberação de substâncias depletantes da camada de ozônio, camada que representa um papel fundamental na proteção do planeta, absorvendo grande parte da radiação ultravioleta (UV) que chega à Terra (HISCHIER *et al.*, 2010). Os impactos dos cenários para essa categoria estão apresentados no Gráfico 3.

Nessa categoria, os C3 e C6 se destacam como mais representativos quanto aos impactos medidos a partir da quantidade de clorofluorocarbonos-11 (CFC-11 equivalente), o C3 apresenta o montante de 1,5E-5 kg CFC-11 eq., o C6 tem a segunda maior contribuição com 1,4E-5 kg CFC-11 eq. Os menores impactos são dos C1 e C5 com 2,5E-6 e 3,0E-6 kg CFC-11 eq. respectivamente.

A eletricidade é o fator preponderante de impacto para essa categoria, para o C3: eletricidade (64 %), ar (17 %), fosfato dissódico (7 %) e Vapor (4 %). Para o C1, de menor impacto, a distribuição se deu: eletricidade (52 %), glicose (22 %) e ar (13 %).

Gráfico 3 - Depleção da camada de ozônio nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina



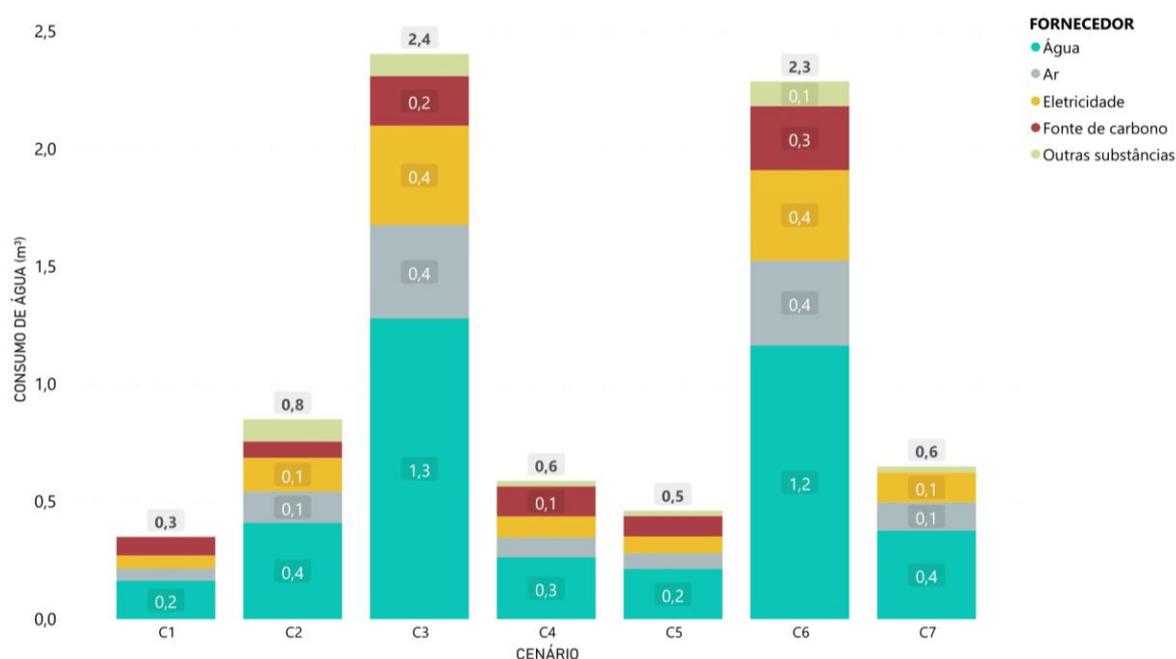
Fonte: Elaboração do autor.

4.3.3 Consumo de água

A categoria de consumo de água visa quantificar o consumo de recursos hídricos e avaliar os possíveis impactos ambientais associados à captação deste recurso. Nesta categoria, a captação de água gera em impacto, enquanto o lançamento de água no corpo hídrico gera crédito. O valor total de consumo de água considera a soma dos impactos e créditos de cada fornecedor. Os impactos dos cenários para essa categoria estão apresentados no Gráfico 4.

Dentre os cenários analisados, o consumo de água, calculado por m³, teve maiores quantitativos para o cenário 3 com aproximadamente 2,4 m³, o segundo maior consumo foi do C6 com 2,3 m³. Os cenários que apresentaram menor uso de água, foram os C1 e o C5, com valores de 0,3 e 0,5 m³ respectivamente. Os cenários C1 e C5 se destacam na menor utilização do recurso devido ao menor quantitativo necessário de matérias-primas e principalmente eletricidade (por conta da maior produtividade) para produzir a unidade declarada de 1 kg de produto.

Gráfico 4 - Consumo de água nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina



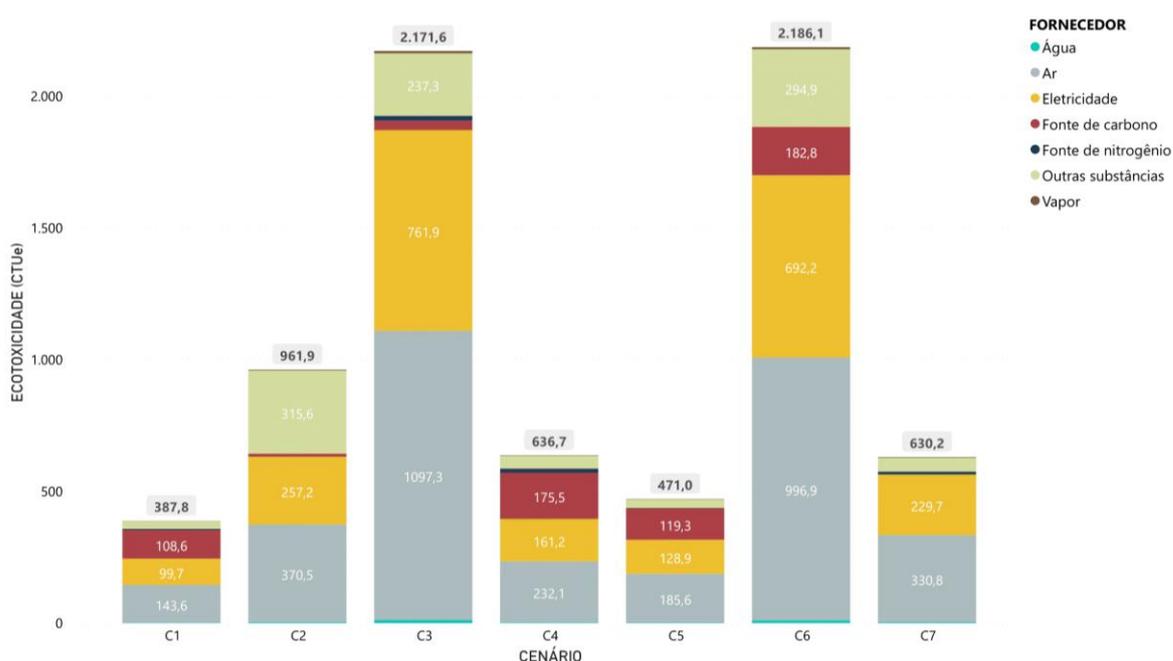
Fonte: Elaboração do autor.

O fornecimento de água para o meio fermentativo se mostrou como o fator de maior relevância para esta categoria, chegando a representar 54 % do uso total de água para o C3, seguido da eletricidade e ar comprimido no processo de produção, representando cada um 17 % desse total. O consumo de água para fornecimento de eletricidade está diretamente relacionado com a matriz utilizada para produção dessa utilidade.

4.3.4 Ecotoxicidade

Baseado no perigo da variedade de produtos químicos, essa categoria expressa por meio da unidade de toxicidade característica (CTUe), fatores cruciais como a persistência da substância no ambiente, sua capacidade de bioacumulação em organismos e sua toxicidade aguda. Essas informações refletem sobre como as substâncias químicas podem afetar os ecossistemas aquáticos (SAOUTER *et al.*, 2018).

Gráfico 5 - Ecotoxicidade nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina



Fonte: Elaboração do autor.

Para essa categoria, o C6 (Gráfico 5) apresenta o maior índice de ecotoxicidade, com 2186 CTUe, seguido do C3 com 2171 CTUe. Já os cenários que apresentaram menores índices foram, C1 (388 CTUe) e C5 (471 CTUe). A distribuição do impacto para os cenários se mostrou mais aguda para essa categoria. No C6 por exemplo, a cadeia de fornecimento do ar representou (46 %) do encargo total, eletricidade (32 %), glicose (8 %) e as demais categorias (14 %). Já, para o cenário 1, o de menor impacto, o ar representou (37 %), fonte de carbono (28 %), eletricidade (26 %) e as demais substâncias (9 %).

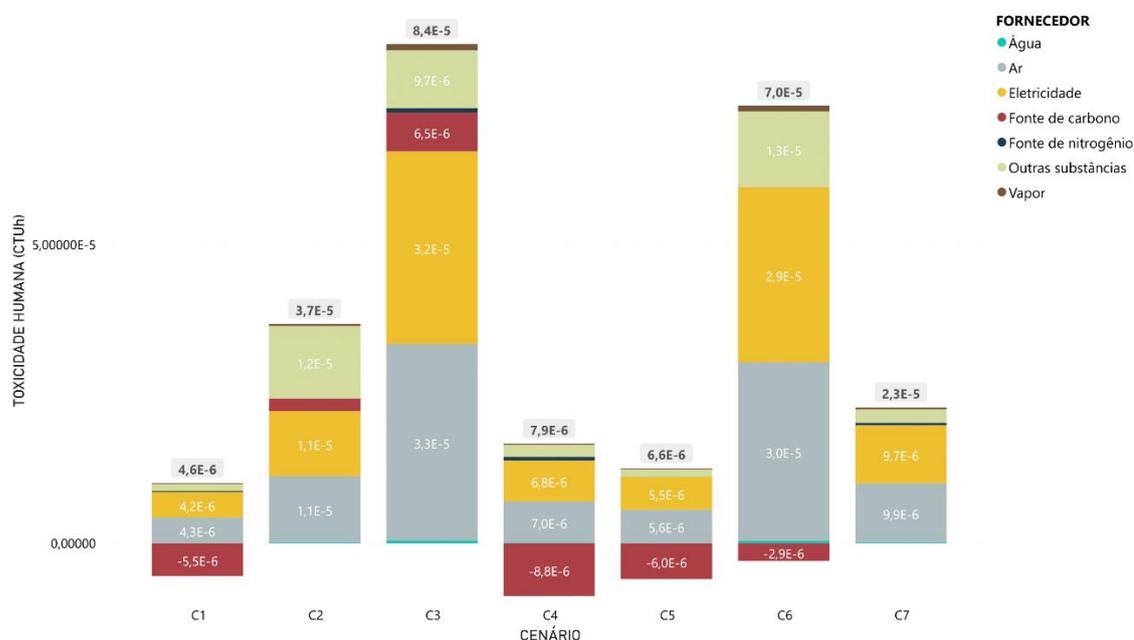
Os demais cenários apresentaram um impacto significativamente menor em relação ao C6 e C3, com o menor cenário (388 CTUe) representando 18 % do maior. Nessa categoria, a utilização dos sais que compõem os meios fermentativos do C6 e C3 apresentaram destaque no impacto total, principalmente por conta por conta molibdato de sódio, fosfato dissódico e sulfato de amônio, sendo responsáveis por uma parcela significativa da ecotoxicidade aquática.

4.3.5 Toxicidade humana

Essa categoria abrange tanto efeitos agudos quanto crônicos, incluindo a avaliação de carcinogenicidade, mutagenicidade e teratogenicidade. São consideradas diferentes vias de exposição, como ingestão, inalação e contato dérmico, para compreender como uma substância é absorvida pelo corpo humano e expressas por uma medida numérica (CTUh) que reflete a toxicidade de uma substância específica para a saúde humana (FANTKE *et al.*, 2021).

O C3 foi o cenário que apresentou mais impacto nessa categoria, com $8E-5$ CTUh (Gráfico 6), seguido do C6 com $7E-5$ CTUh. Os resultados dessa categoria apresentam uma peculiaridade quanto a distribuição dos impactos de toxicidade humana dos fornecedores, visto que, a cadeia de fornecimento de glicose apresenta um valor negativo de toxicidade o que atenua os impactos do C6, do C4 ($8E-6$ CTUh), o C5 ($7E-6$ CTUh) e do C1 ($5E-6$ CTUh). Isso acontece porque, para a cadeia de fornecimento de glicose considerada no estudo (Apêndice B), é utilizado um amido extraído da cadeia produtiva do milho. O inventário desse produto agrícola considera a absorção de metais pela planta, cobre e zinco neste caso, o que é suficiente para tornar o total desse impacto negativo.

Gráfico 6 - Toxicidade humana nos cenários avaliados de produção de 1 kg de surfactina



Fonte: Elaboração do autor.

Nemecek & Schnetzer (2011) afirmam que “alguns dos valores de emissões de metais pesados para o solo são negativos. Isto significa que são exportados mais metais pesados do que importados. Deve-se, no entanto, ter em mente que estes metais pesados são transferidos ou para os corpos d’água ou para os produtos colhidos no campo”. No entanto, estes resultados negativos devem ser interpretados com cuidado devido ao risco da exposição à água ou produto agrícola contaminado.

Analisando as categorias apresentadas, é possível perceber que o cenário 2, mesmo apresentando o maior fator de conversão de 26 % w/w de substrato em surfactina, este cenário não apresentou os menores índices nos impactos ambientais, devido principalmente, as maiores contribuições geradas pela fonte de nitrogênio. Já, o cenário C1, com fator de conversão de 16 % w/w de substrato em surfactina se destacou apresentando menores impactos ambientais nas categorias avaliadas. Na sessão a seguir, os resultados obtidos para os cenários avaliados serão apresentados juntamente com resultados de biossurfactantes da literatura consultada.

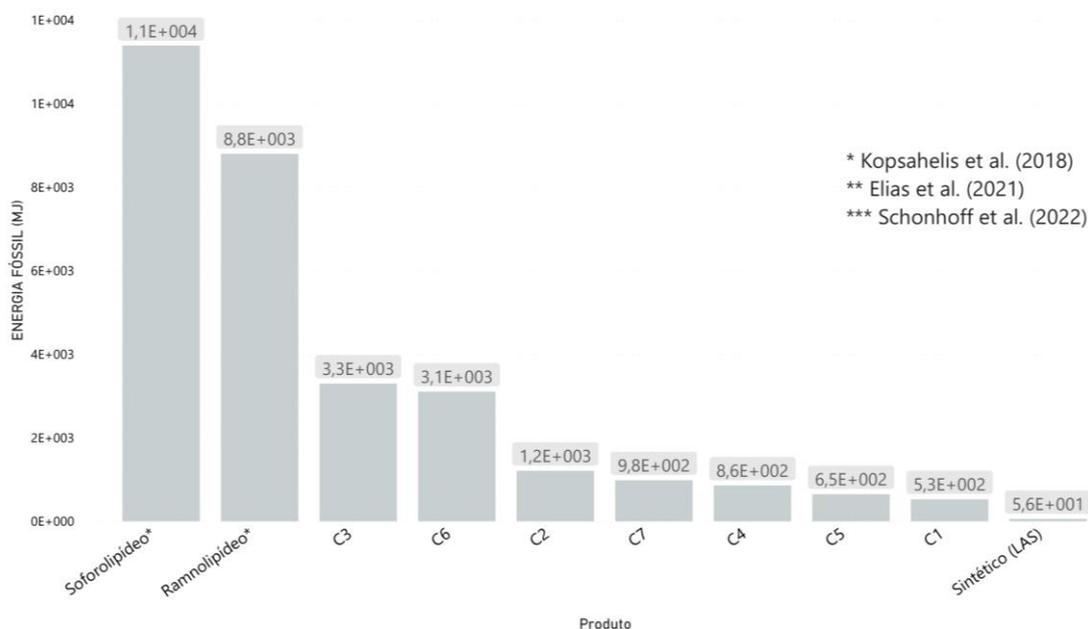
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE SURFACTANTES

Nessa sessão, comparam-se os resultados obtidos por categorias avaliadas dos cenários base para a surfactina, que é um lipopeptídeo, com resultados de ACV de outros biossurfactantes obtidos na literatura. Destaca-se que não foi encontrado até o momento outro estudo de ACV publicado com revisão por pares para a produção de surfactina, tão pouco estudos de ACV de outro surfactante da classe dos lipopeptídeos. Desta forma, a comparação a seguir se dá entre as classes de soforolipídeos (SL), ramnolipídeos (RL) e manosileritritol lipídios (MELs) para a unidade declarada de 1 kg da produção de cada produto, visto que eles são biossurfactantes com informações de estudo de ACV disponíveis na literatura.

No Gráfico 7, são apresentadas as características dos estudos de biossurfactantes encontrados na literatura. Os estudos comparados com os cenários base também consideram a produção em escala industrial aumentada a partir de processos laboratoriais, planta piloto ou dados obtidos da literatura. Ainda no Gráfico 7 são apresentados os resultados da utilização de energia fóssil nos diferentes estudos.

É possível perceber que a maior demanda de energia fóssil é para o soforolipídeo seguido do ramnolipídeo proposto pelo estudo de Kopsahelis *et al.* (2018), o cenário 3 que foi o cenário de maior impacto entre os propostos para a surfactina representa aproximadamente 30 % do SL avaliado e 38 % do RL. É importante destacar no estudo apresentado, para a produção de 1 kg de SL é consumido aproximadamente 600 kWh e para o RL é 390 kWh. Destaca-se que a matriz elétrica utilizada no estudo foi a da Grécia, a qual correspondente a um mix de lignito (54 %), petróleo (11 %), gás natural (17 %) e fontes renováveis (18 %) de acordo com o fornecedor *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - GR*.

Gráfico 7 - Comparação do consumo de energia fóssil dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante



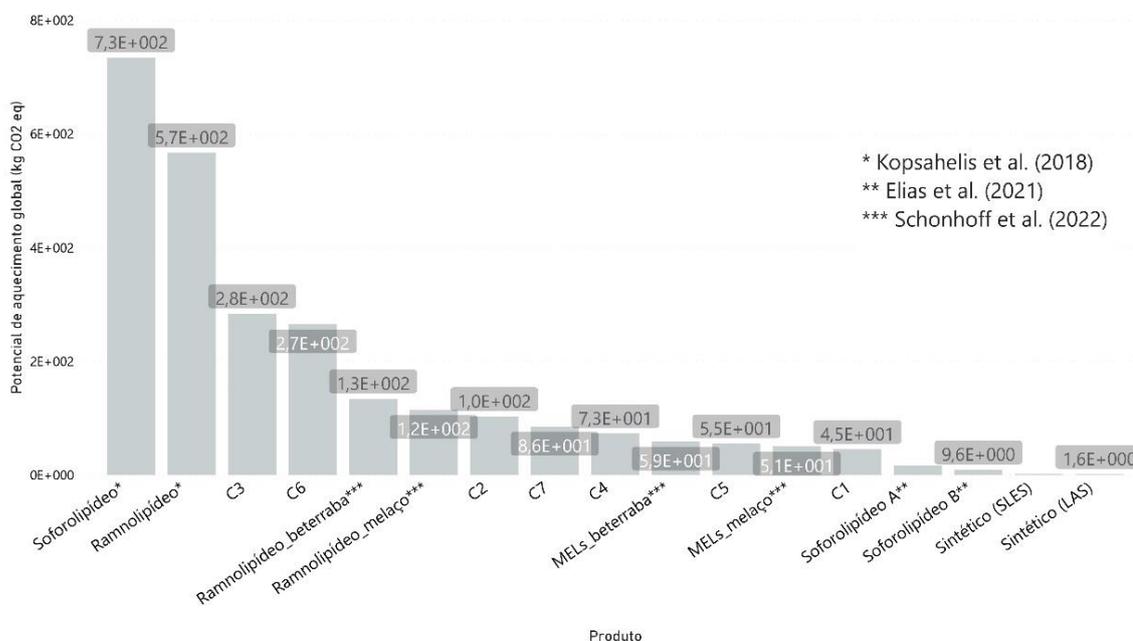
Fonte: Elaboração do autor.

Para os cenários 3 e 6, o consumo de eletricidade foi de aproximadamente 700 kWh e 630 kWh, já para o cenário 1, que apresentou menor impacto nessa categoria, o consumo de eletricidade foi de 91 kWh. O fornecimento de eletricidade utilizado nos cenários de C1 a C7 é da matriz elétrica do Brasil (*Ecoinvent 3.8*), em que aproximadamente 85 % advêm de hidrelétricas, o que justifica a redução de consumo de energia fóssil nos modelos mesmo apresentando cenários com maior uso de eletricidade no processo. O LAS apresentou o menor uso de energia fóssil nessa categoria.

A comparação do potencial de aquecimento global (GWP100a) com resultados da literatura consultada é apresentado no Gráfico 8. No estudo de Schonhoff *et al.* (2022), o RL apresenta menor rendimento específico (já que nesse estudo foram considerados o rendimento de limpeza de cada tensoativo) e a taxa de conversão mais baixa em comparação com os MELs, baseado na concentração micelar crítica (CMC), foi considerado que é necessário 3,6 kg de RL para que ambos exercessem a mesma função, como os estudos comparativos nesse estudo se refere a unidade de 1kg de surfactante, portanto, os impactos ambientais apresentados dos RLs deste estudo

foram convertidos para 1 kg de produto para que houvesse compatibilidade nas comparações.

Gráfico 8 - Comparação do potencial de aquecimento global dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante



Fonte: Elaboração do autor.

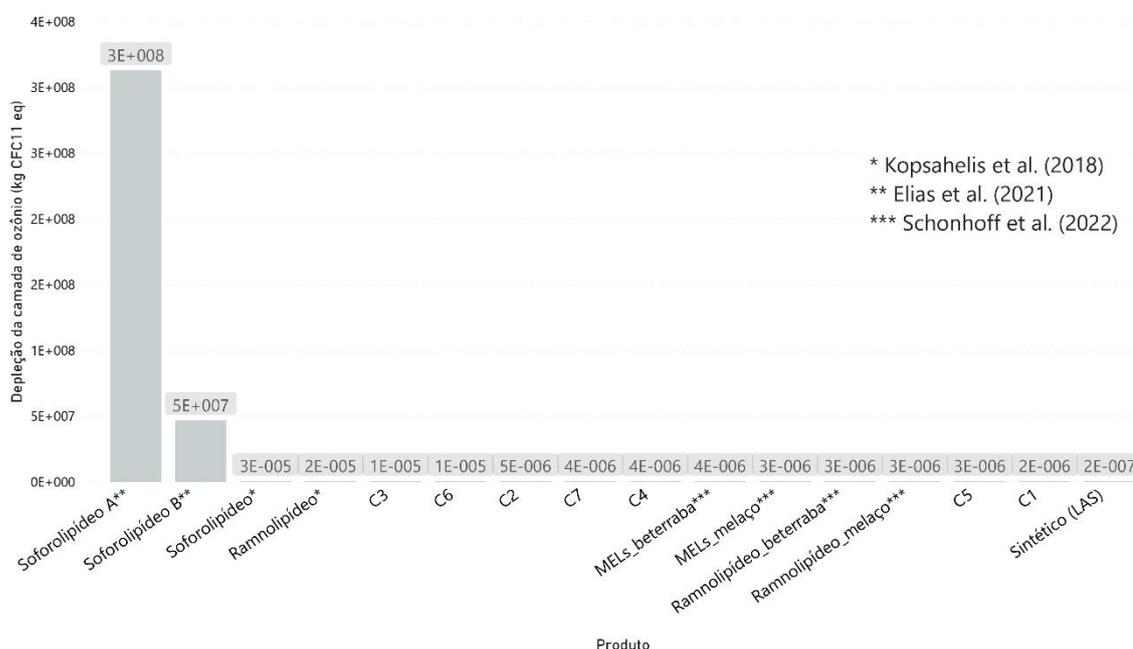
Os maiores impactos nessa categoria foram dos biossurfactantes apresentados no estudo de Kopsahelis *et al.* (2018), o SL se destacou apresentando 735 kg CO₂ equivalentes, enquanto o RL apresentou 567 kg CO₂ eq. O alto valor do potencial de aquecimento global desses produtos é devido ao consumo das utilidades energéticas e os impactos das fontes consideradas no estudo.

Em seguida encontram-se os cenários da surfactina, o C3 com maior impacto 284 kg CO₂ eq. E C6 com 266 kg CO₂ eq. Os ramnolípídeos produzidos a partir da beterraba e melão respectivamente apresentaram um potencial de aquecimento global de 134 kg CO₂ eq. E 115 kg CO₂ eq. (SCHONHOFF *et al.*, 2022).

O MELs obtidos por beterraba e melão apresentaram 59 e 51 kg CO₂ eq, apresentando maior impacto em relação ao C1. É possível notar que no mesmo estudo Schonhoff *et al.* (2022) apresentam resultados de dois biossurfactantes distintos produzidos por substratos (fonte de carbono) diferentes. Os RLs apresentaram potencial de aquecimento global maior que os MELs, chegando a apresentar mais que duas vezes o impacto para o mesmo substrato. Isso se deve ao fato que o RL apresenta

uma taxa de conversão mais baixa em comparação com os MELs. Isso resulta em um quantitativo significativamente maior de fluxos, como o caldo de fermentação. Como consequência, a produção de RL exige quantidades mais elevadas de energia e materiais por quilograma de produto, resultando em um aumento dos impactos ambientais.

Gráfico 9 - Comparação da depleção da camada de ozônio dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante



Fonte: Elaboração do autor.

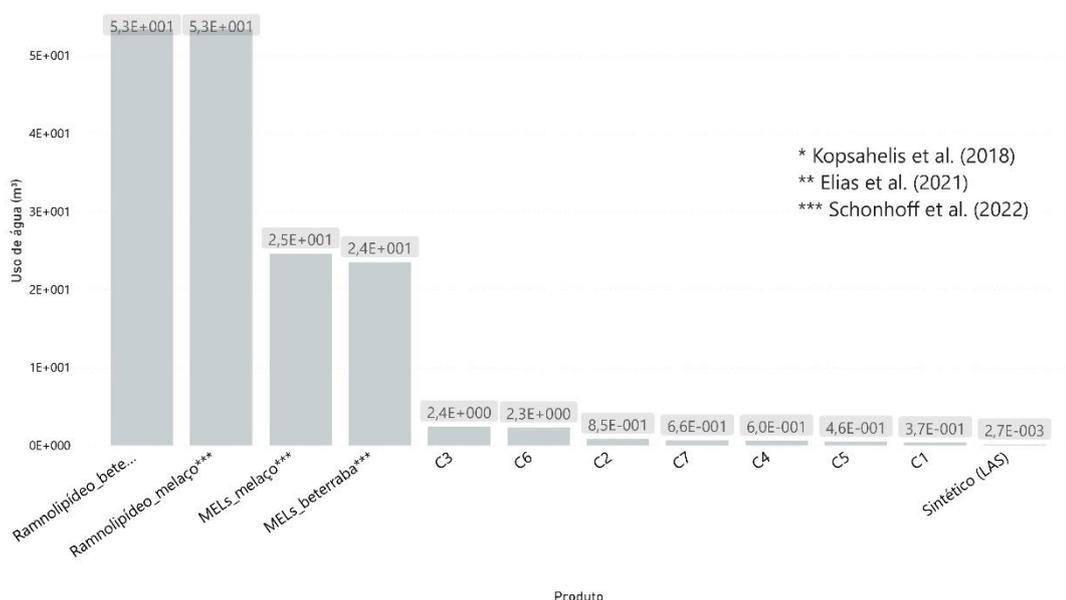
Os menores quantitativos do potencial de aquecimento global entre os biossurfactantes foram os do SL A e SL B de Elias *et al.* (2021). É válido destacar que a ACV dos SL A e SL B foram desenvolvidos a partir de dados de uma biorrefinaria localizada em São Paulo, sendo possível inferir que o fornecimento das utilidades é referente a geografia local. Nesse estudo, os autores destacam que foi considerado uma integração térmica por otimização *pinch* de calor entre a biorrefinaria (através da produção de vapor e de eletricidade) e linha de produção do biossurfactante. Por conta disso, os encargos ambientais são contabilizados na biorrefinaria, o que justificaria o menor valor do potencial de aquecimento global. Os surfactantes sintéticos apresentaram

menor índice de potencial aquecimento global, com destaque para o LAS que apresentou 3 % do impacto do C1 (cenário base de menor impacto da surfactina).

A comparação da categoria de depleção da camada de ozônio com estudos da literatura consultada é apresentada no Gráfico 9. Os SL A e SL B apresentaram maiores índices de depleção da camada de ozônio (ODP) em comparação com os estudos analisados, entre os cenários da surfactina, as maiores contribuições foram do fornecimento de eletricidade, ar, e os demais elementos suplementadores da reação (como molibdato de sódio e fosfato dissódico). O LAS apresentou o menor resultado nessa categoria.

No Gráfico 10, é apresentada a comparação do consumo de água para os diferentes estudos. É possível identificar que os biossurfactantes encontrados na literatura apresentam maior consumo de água do que os cenários modelados para a surfactina. O LAS é o que apresenta menor uso de água.

Gráfico 10 - Comparação do consumo de água dos cenários avaliados e literatura consultada para a produção de 1 kg de surfactante



Fonte: Elaboração do autor.

Os RLs que utilizaram como substrato beterraba e melaço se destacam pelos maiores consumos de água no processo, porém Schonhoff *et al.* (2022) não apresentam no estudo de forma distinta as parcelas de contribuição do impacto por etapas

envolvidas. No mesmo estudo, os MELs que usaram tanto o melaço quanto de beterraba como substrato apresentaram menor uso de água do que os RLs mas ainda com elevado destaque em comparação com os cenários da surfactina. O cenário C1 e C5, respectivamente, foram os que tiveram menor impacto nessa categoria. Também nessa categoria, o LAS apresenta menor impacto.

É importante destacar que dentre os cenários propostos para a surfactina em escala industrial, os cenários 3 e 6 apresentaram os maiores impactos nas categorias avaliadas, sendo possível inferir que os baixos índices dos fatores de conversão (substrato/concentração de surfactina) destes cenários, em relação aos demais, convergem para esses resultados, visto que quanto o menor índice de conversão, mais recursos são utilizados para produzir a mesma unidade declarada.

Foi realizada uma análise comparativa dos cenários de biossurfactantes com o surfactante sintético de maior representatividade mercadológica no mundo (JONES-COSTA, 2018) para apoiar a identificação de oportunidades de redução dos impactos ambientais para tornar os biossurfactantes mais competitivos no mercado de saneantes, entretanto, para todas as categorias analisadas, o LAS apresentou menor impacto.

4.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O C1 se destacou entre os cenários base devido aos seus menores de impactos ambientais nas categorias avaliadas. Dentre os fatores que contribuíram para esses resultados, a concentração de surfactina (g/L) desse cenário se apresenta como um dos mais relevantes.

Destaca-se também que a fonte de carbono tem um papel relevante nos impactos ambientais dos cenários, assim como a matriz energética utilizada para suprir as utilidades (eletricidade, ar comprimido e vapor) do processo fabril. Com esse entendimento, foram propostos cenários alternativos para a análise de sensibilidade para esses elementos que se mostraram expressivos (Apêndice B).

Os cenários alternativos 1, 2 e 3 foram derivados do C1, cenário de menor impacto ambiental entre os cenários modelados. O cenário Alternativo 4 se baseia no C7, no entanto, o fator de concentração foi ajustado para igualar ao do C1 (6,4 g/L),

que demonstrou a mais alta taxa de conversão entre todos os cenários da surfactina. Já o cenário Alternativo 5, baseando-se no Alternativo 4, propõe adicionalmente, a substituição da matriz elétrica para as utilidades (eletricidade, ar comprimido e vapor) por meio do fornecimento de uma usina fotovoltaica. Os resultados das categorias avaliadas para cenários Alternativos são apresentados na Tabela 4.

No cenário Alternativo 1, a substituição da fonte de carbono apresentou uma redução de impactos nas categorias de energia fóssil, potencial de aquecimento global, depleção da camada de ozônio e ecotoxicidade se comparado ao cenário 1, e apresentou um maior impacto no consumo de água (devido uso de recursos agroindustriais) e maior impacto na toxicidade humana, visto que para a produção do milho (insumo para glicose) são considerados os sequestros dos metais pesados cobre e zinco pela planta.

Tabela 4 - Comparação dos cenários Alternativos ao Cenário 1 (C1) de produção de 1 kg de surfactina nas categorias avaliadas.

PRODUTO	Energia fóssil (MJ)		Potencial de aquecimento Global (kg CO2 eq)		Depleção da camada de ozônio (kg CFC11 eq)		Consumo de Água (m ³)		Ecotoxicidade (CTUe)		Toxicidade humana, total (CTUh)	
	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)
C1	5.27E+02	↓	4.54E+01	↓	2.48E-06	↓	3.66E-01	↓	3.88E+02	↓	4.61E-06	↓
ALTERNATIVO 1	4.58E+02	-13%	3.88E+01	-15%	2.12E-06	-14%	3.98E-01	9%	2.98E+02	-23%	1.35E-05	192%

PRODUTO	Energia fóssil (MJ)		Potencial de aquecimento Global (kg CO2 eq)		Depleção da camada de ozônio (kg CFC11 eq)		Consumo de Água (m³)		Ecotoxicidade (CTUe)		Toxicidade humana, total (CTUh)	
	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)	Valor	(%)
ALTERNATIVO 2	1.04E+03	97%	8.84E+01	95%	2.94E-06	19%	5.66E-01	54%	5.11E+02	32%	1.59E-05	244%
ALTERNATIVO 3	2.47E+02	-53%	2.08E+01	-54%	1.79E-06	-28%	2.99E-01	-18%	4.91E+02	27%	4.29E-06	-7%
ALTERNATIVO 4	4.27E+02	-19%	3.72E+01	-18%	1.90E-06	-23%	2.86E-01	-22%	2.74E+02	-29%	9.88E-06	114%
ALTERNATIVO 5	1.46E+02	-72%	1.26E+01	-72%	1.22E-06	-51%	2.18E-01	-40%	3.77E+02	-3%	9.55E-06	107%

Fonte: Elaboração do autor.

No cenário Alternativo 2, fica evidente o quanto a substituição do fornecimento de eletricidade para uma matriz menos renovável impacta negativamente nos coeficientes ambientais avaliados, apresentando um acréscimo de 97 % em energia fóssil e 95 % de potencial de aquecimento global, e aumento de impacto em todas as categorias avaliadas.

O cenário Alternativo 3, que houve o deslocamento para o fornecimento de eletricidade de usina fotovoltaica, apresentou uma redução nas categorias de energia

fóssil (53 %) e potencial de aquecimento global (54 %) comparado ao C1. As categorias de depleção da camada de ozônio, consumo de água e ecotoxicidade também apresentaram redução. A categoria de toxicidade humana apresentou redução (7 %), devido ao uso de placas fotovoltaicas para fornecimento de ar do cenário.

O cenário Alternativo 4, com o mesmo coeficiente de concentração de surfactina (g/L) do C1 e fonte residual de glicose do C7, apresenta reduções dos impactos ambientais nas categorias de energia fóssil (19 %), potencial de aquecimento global (18 %), depleção da camada de ozônio (23 %), consumo de água (22 %) e ecotoxicidade (29 %). No entanto, houve um aumento do impacto de toxicidade humana devido a substituição da fonte de carbono.

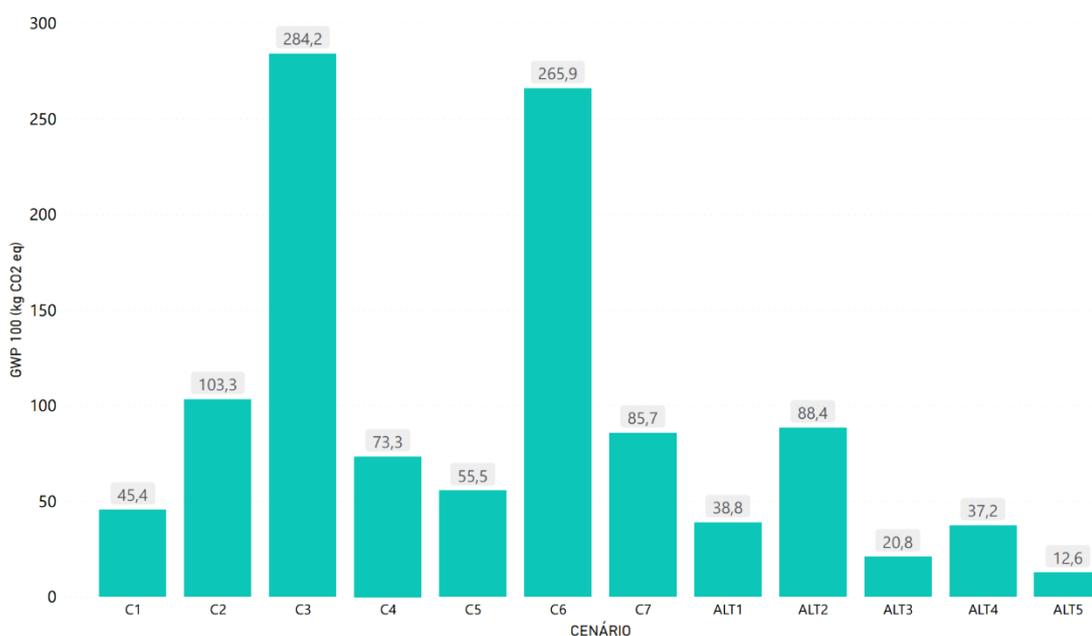
O cenário Alternativo 5, elaborado a partir do cenário Alternativo 4 e substituição do fornecimento de eletricidade das utilidades (eletricidade, ar comprimido e vapor) da matriz elétrica brasileira para uma usina fotovoltaica, teve destaque em relação aos demais devido a redução dos impactos ambientais das categorias: energia fóssil (72 %), potencial de aquecimento global (72 %), depleção da camada de ozônio (51 %) e consumo de água (40 %) comparado ao C1 (o mais favorável entre os cenários base). Já para a toxicidade humana, os resultados do cenário Alternativo 5 foram desfavoráveis devido a peculiaridade benéfica de sequestro de metais pesados na cadeia de produção da glicose no cenário 1. O Gráfico 11 apresenta os cenários C1-C7 juntamente com os cenários Alternativos 1-5 para a categoria de potencial de aquecimento global.

É possível notar nesse gráfico a redução do potencial de aquecimento global exercida pela análise de sensibilidade, a variação mais evidente trata da disparidade entre o C3 e o cenário Alternativo 5, em que houve uma redução de aproximadamente 96 % do impacto, as alterações mais relevantes entre esses cenários são: o fator de conversão mássico de 8 %w/w para 16 %w/w do substrato em surfactina, utilização de fonte de carbono residual e fornecimento de utilidades (eletricidade, ar e vapor) de usina fotovoltaica.

A utilização de matérias-primas residuais é um aspecto relevante da produção de surfactina no intuito de reduzir os impactos ambientais (Gráfico 11), assim como reduzir os custos de produção de 10 % a 30 % (MOHANTY *et al.*, 2021). Entretanto, os resultados dos cenários alternativos com matéria-prima de fonte residual foram obtidos para uma concentração (g/L) de surfactina simulado para a produção com matéria-prima não residual, a qual é superior ao que foi obtido em Janek *et al.* (2021).

Esses resultados reafirmam o que foi apresentado por Vicente *et al.* (2022), que são necessários maiores esforços para tornar mais eficiente e econômica a produção da surfactina e a utilização de matéria-prima de fonte residual e aumento de fatores de concentração de surfactina se apresentam como boas estratégias.

Gráfico 11 - Comparação do potencial de aquecimento global dos cenários base (C1-C7) e cenários alternativos de produção de 1 kg de surfactina.



Fonte: Elaboração do autor.

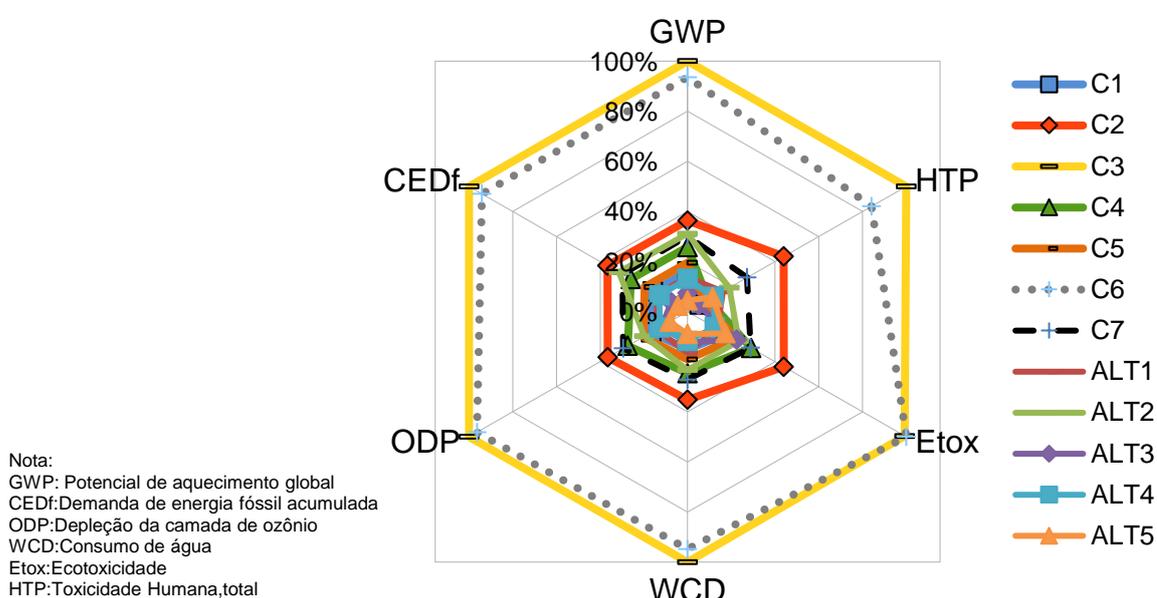
No gráfico radar (Gráfico 12) são apresentados todos os cenários-base (C1-C7) e cenários-alternativos (Alternativos 1-5) com seus impactos nas categorias de impacto consideradas no estudo, sendo possível destacar a mitigação dos impactos advindos das considerações das análises de sensibilidade.

Mesmo que a surfactina apresente um desempenho ambiental mais favorável em relação à literatura consultada, ainda há desafios para a redução dos seus impactos ambientais quando comparados, em unidade declarada de 1kg de produto, aos surfactantes sintéticos com rotas tecnológicas estabelecidas, melhor fator de conversão e custos reduzidos de produção.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com os dados de ACV do LAS (*market for alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical | alkylbenzene sulfonate,*

linear, petrochemical | Cutoff, U - GLO) extraídos da base de dados da *ecoinvent 3.8* para as categorias avaliadas neste estudo em comparação ao C1 e Alternativo 5, levando em consideração a expansão da fronteira do sistema devido a multifuncionalidade do Alternativo 5, que trata resíduo e produz surfactante em comparação ao LAS que apenas produz surfactante, o impacto do tratamento de resíduo que deixou de ocorrer, devido a fonte de glicose ter sido residual, foi considerado como soma direta para os impactos do LAS.

Gráfico 12 - Comparação de todas as categorias de impacto analisadas para os cenários base (C1-C7) e cenários alternativos de produção de 1 kg de surfactina.



Fonte: Elaboração do autor.

Os resultados das análises de sensibilidade apontam para caminhos factíveis de mitigação dos impactos ambientais da produção de surfactina. As reduções de impacto apresentadas nas variações dos resultados do C1 e o cenário Alternativo 5 (Gráfico 11) são relevantes, no entanto, a Tabela 5 apresenta o desafio da surfactina se tornar tão competitiva, em relação aos níveis ambientais, quanto o LAS. É necessário destacar que os produtos comparados não apresentam a mesma função, visto que foram comparados para 1 kg de produto independentemente do nível de desempenho de limpeza específico.

Tabela 5 - Comparação do cenário Alternativo 5 com expansão de fronteira e linear alquilbenzeno sulfonato (LAS) para a produção de 1 kg de surfactante.

Produto	Potencial de aquecimento Global (kg CO2 eq)
Alternativo 5	12.61
LAS	1.58
Contribuição para o tratamento de resíduo	
(1) *market for municipal solid waste municipal solid waste Cutoff, U - RoW	5.93
(2) *treatment of biowaste, municipal incineration biowaste Cutoff, U - GLO	0.23
(3) ¹ *market for waste paperboard waste paperboard Cutoff, U - BR	17.03
LAS + tratamento de resíduo (1)	5.93
LAS + tratamento de resíduo (2)	0.23
LAS + tratamento de resíduo (3)	17.03

Nota: *Contribuição para o tratamento de 6,2kg de resíduo

¹ 88% de aterro controlado, 8% lixão ao ar livre, 3% queima e 1% incineração municipal.

Fonte: Elaboração do autor.

4.5 OPORTUNIDADES E DESAFIOS

Estudos recentes têm focado em melhorar as condições de escalabilidade da surfactina, com estratégias como otimização do meio fermentativo, métodos de engenharia genética, síntese heteróloga (transferência de genes ou vias metabólicas de um organismo para outro) e a combinação de biologia sintética e engenharia metabólica estão sendo estudadas para o desenvolvimento tecnológico deste setor (XIA; WEN, 2022; ZHEN *et al.*, 2023; KISIL *et al.* 2023).

Em escala laboratorial e com cepa geneticamente modificada, Wu *et al.* (2019) obtiveram uma concentração de 12,8 (g/L) e Chen *et al.* (2020) obtiveram resultados com rendimento de surfactina de 4 vezes o valor da cepa original. Klausmann *et al.* (2021) por meio da *B. subtilis* JABs32 não esporulante, com mutações nos genes e condições de fermentação de alta densidade celular (HCDF) em um meio de glicose e suplementado com fosfato de amônio dibásico em biorreator de 30 litros, obteve uma concentração de surfactina de até 26,5 g/L, Qi *et al.* (2023) aponta que essa concentração de surfactina obtida é o nível de produção mais alto relatado.

Caso os níveis de concentração de surfactina em escala industrial alcancem a concentração de surfactina obtida por Klausmann *et al.* (2021), o cenário Alternativo 5 produziria 3 vezes mais surfactina por batelada, reduzindo em 75 % os impactos ambientais, o que significaria dizer que 1kg de surfactina, dada as condições do cenário Alternativo 5 com expansão de fronteira (Tabela 5), produziria 4,2 kg de CO₂ equivalente, frente a 1,8 kg de CO₂ equivalente que é necessário para a produção de 1kg de LAS, considerando o tratamento de resíduo *treatment of biowaste, municipal incineration | biowaste | Cutoff, U - GLO*.

Partindo do entendimento de que a quantidade utilizada de surfactante diz respeito ao seu poder de redução de tensão superficial, de acordo com (SCHONHOFF *et al.*, 2022), a função de desempenho de limpeza específico (SCP) pode ser definida a partir da concentração micelar crítica (CMC). A princípio, quanto menor o CMC mais eficiente é o surfactante e mais favorável é a economia de uso em processos industriais, o ponto de CMC indica a concentração adequada para um uso efetivo, determinado pela massa específica do surfactante por volume de solvente (g/L), uma vez que a redução da tensão superficial não ocorre além desse ponto. Dessa forma, para o CMC de 590 mg/L do LAS e 11 mg/L da surfactina (BOGNOLO, 1999), significaria dizer que, a partir do SCP, seria necessário 54 kg de LAS para cumprir a mesma funcionalidade que o 1 kg de surfactina.

Com base nessa premissa, ao avaliar o SCP para a produção de 1 kg de surfactina no cenário Alternativo 5, o qual resultou em 12,61 kg de CO₂ eq., desconsiderando a expansão da fronteira associada ao tratamento do resíduo utilizado como fonte de carbono, em comparação com o SCP do LAS, que totalizou 1,58 kg de CO₂ eq., para uma função equivalente, observa-se que o surfactante sintético seria responsável por 85,34 kg de CO₂ eq. Essa cifra representa aproximadamente sete vezes mais impacto no potencial de aquecimento global em comparação ao biossurfactante. O que reforça o argumento apresentado por Rodrigues (2015) de que os surfactantes microbianos são mais eficazes e eficientes no seu CMC, portanto, é necessário menos surfactante para obter uma diminuição máxima na tensão superficial.

Os recentes avanços tecnológicos indicam o potencial ainda maior da produção de biossurfactantes em níveis mais eficientes, tornando-as mais sustentáveis e competitivas comercialmente, até mesmo com os surfactantes sintéticos estabelecidos no mercado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta sessão estão apresentadas a conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental da surfactina com abrangência do berço-ao-portão da fábrica (*cradle-to-gate*) em escala industrial, destacando quais os principais fatores contribuintes dos impactos ambientais avaliados para propor alternativas de mitigação destes impactos. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) se mostrou capaz de guiar essa avaliação. Os cenários propostos foram baseados em estudos experimentais laboratoriais com aumento de escala, tal metodologia é convergente com outros estudos de biossurfactantes, visto que, não houve a possibilidade de utilização de dados primários devido à não existência de uma unidade produtiva industrial de surfactina no Brasil, assim como, não há informações de ACV para a surfactina disponíveis em artigos na literatura.

A análise dos impactos do ciclo de vida nas categorias avaliadas demonstra uma consistência nos resultados obtidos para os impactos ambientais dos cenários avaliados (C1-C7) para a produção de surfactina. Esses resultados são comparáveis aos obtidos para a produção de outros biossurfactantes fabricados por processos semelhantes aos apresentados neste estudo.

A escolha da matriz elétrica foi significativa nos impactos ambientais das categorias avaliadas, assim como o substrato empregado, com os residuais apresentando as condições mais favoráveis. Entre os parâmetros envolvidos, destaca-se a concentração da surfactina (g/L), uma vez que, com coeficientes de conversão mais baixos, é necessário um volume maior de meio fermentativo e utilidades para alcançar a mesma unidade declarada de 1 kg de surfactina produzida.

As propostas de cenários alternativos, contendo diferentes sugestões de mitigação de impacto, revelaram-se pertinentes para reduzir os impactos ambientais da produção de surfactina. A condição mais favorável foi identificada em um cenário que utiliza matéria-prima residual como fonte de carbono, alcança uma concentração otimizada de surfactina (6,45 g/L) e emprega um fornecedor de eletricidade de usina

fotovoltaica para as utilidades (eletricidade, ar comprimido e vapor) necessárias à produção. Esses cenários conseguiram reduzir em até 70 % o potencial de aquecimento global em comparação ao cenário base mais favorável.

A surfactina demonstrou ser um biossurfactante com melhor desempenho ambiental em comparação aos estudos de ACV da literatura consultada para outras categorias de biossurfactantes. No entanto, para uma mesma unidade declarada, quando comparada a surfactantes sintéticos, que são produzidos em larga escala de maneira otimizada e com tecnologia consolidada, é evidenciado que os biossurfactantes necessitam de um maior desenvolvimento tecnológico para que possam aumentar a eficiência e competir economicamente.

Ao avaliar o desempenho de limpeza específico obtido a partir da concentração micelar, os resultados apontam que a surfactina tem potencial para apresentar melhor desempenho ambiental que surfactantes sintéticos para uma mesma função de limpeza. Para isso são necessários avanços que torne possível aumentar o fator de conversão (w/w) de surfactina, principalmente para produção a partir de fontes de carbono residuais, juntamente com a utilização de matriz elétrica de fontes renováveis no processo produtivo.

Os principais *players* do mercado de saneantes estão inclinados para o desenvolvimento e utilização de tensoativos biológicos em novos produtos, além disso, novas tecnologias tais como: otimização do meio fermentativo, engenharia genômica e a combinação de biologia sintética e engenharia metabólica estão apresentando resultados promissores que impactam o potencial de expansão do mercado de biossurfactantes. Isso sugere que, em uma perspectiva futura, os biossurfactantes possam competir com os surfactantes sintéticos em proporções similares. Embora, até o momento, a produção de surfactina apresente custos elevados e baixa produtividade, há uma grande expectativa no desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a produção em larga escala com níveis ambientais mais favoráveis.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido ao rápido avanço das tecnologias de bioprocessos voltadas para a produção de biossurfactantes com níveis inéditos de concentração de surfactina no meio de cultivo em escalas de bancada de laboratório e piloto, recomenda-se a condução

de novas simulações em planta piloto ou escala industrial para avaliar os impactos ambientais associados às inovadoras abordagens de produção em desenvolvimento.

A ACV realizada diz respeito a um conjunto de tecnologias de produção coerentes e validadas, todavia, existem diferentes formas de se produzir a surfactina, dada importância do processo de purificação para o produto final, sugere-se expandir os conhecimentos sobre os impactos ambientais considerando outras formas de purificação para a surfactina.

Recomenda-se realizar uma análise tecno-econômica comparativa entre a produção de surfactina e a produção do LAS no intuito de fomentar estratégias de viabilidade na produção de biossurfactantes e barateamento dos custos de produção. Estas investigações são essenciais para apoiar a tomada de decisão no próprio desenvolvimento tecnológico e implementação da produção em escala industrial para atender o mercado de saneantes com práticas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009a. NBR ISO 14040. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009b. NBR ISO 14044. **Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2022. **Gestão ambiental - Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AFOLABI, Funsho *et al.* Polymeric surfactants for enhanced oil recovery: A review of recent progress. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 208, p. 109358, 2022.
- AHMADI, Mohammadali *et al.* Interfacial and molecular interactions between fractions of heavy oil and surfactants in porous media: Comprehensive review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 283, p. 102242, 2020.
- AKBARI, Sweeta *et al.* Biosurfactants—a new frontier for social and environmental safety: a mini review. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 2, n. 1, p. 81-90, 2018.
- AKIZU-GARDOKI, Ortzi *et al.* Ecodesign coupled with Life Cycle Assessment to reduce the environmental impacts of an industrial enzymatic cleaner. **Sustainable Production and Consumption**, v. 29, p. 718-729, 2022.
- AL-BAHRY, S. N. *et al.* Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B20 using date molasses and its possible application in enhanced oil recovery. **International Biodeterioration e Biodegradation**, v. 81, p. 141-146, 2013.
- ALONSO, Saúl; MARTIN, Peter J. Impact of foaming on surfactin production by *Bacillus subtilis*: implications on the development of integrated in situ foam fractionation removal systems. **Biochemical Engineering Journal**, v. 110, p. 125-133, 2016.
- AMANI, Hossein *et al.* Scale up and application of biosurfactant from *Bacillus subtilis* in enhanced oil recovery. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 162, p. 510-523, 2010.
- AMBAYE, Teklit Gebregiorgis *et al.* Preparation, characterization and application of biosurfactant in various industries: A critical review on progress, challenges and perspectives. **Environmental Technology e Innovation**, v. 24, p. 102090, 2021.
- ARIMA, Kei; KAKINUMA, Atsushi; TAMURA, Gakuzo. Surfactin, a crystalline peptidolipid surfactant produced by *Bacillus subtilis*: Isolation, characterization and its inhibition of fibrin clot formation. **Biochemical and biophysical research communications**, v. 31, n. 3, p. 488-494, 1968.

- ARU, O. O.; IKECHUKWU, N. E. O. Life Cycle Assessment of the Environmental Impact of Biosurfactant Production from Oil Waste by a Diculture of *Azotobacter vinelandii* and *Pseudomonas* Sp. **J. Bioremediat. Biodegr**, v. 9, n. 2, p. 10.4172, 2018.
- BACCILE, Niki *et al.* Development of a cradle-to-grave approach for acetylated acidic sophorolipid biosurfactants. **ACS Sustainable Chemistry e Engineering**, v. 5, n. 1, p. 1186-1198, 2017.
- BAGHERI, Hamidreza *et al.* Application of low molecular weight and high molecular weight biosurfactant in medicine/biomedical/pharmaceutical industries. In: **Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science**. Academic Press, 2022. p. 1-60.
- BAIN e COMPANY. **Relatório 4 – Tensoativos. Potencial de diversificação da indústria química brasileira**. 1 Ed. 2014. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/arquivos/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Relat4_tensoativos.pdf>. p. 4 e 6. Acessado em: 10. Out. 2022.
- BAINDARA, Piyush *et al.* Surfactin-like lipopeptides from *Bacillus clausii* efficiently bind to spike glycoprotein of SARS-CoV-2. **Journal of Biomolecular Structure and Dynamics**, p. 1-12, 2023.
- BANAT, Ibrahim M. *et al.* Cost effective technologies and renewable substrates for biosurfactants' production. **Frontiers in microbiology**, v. 5, p. 697, 2014.
- BARROS, Francisco Fábio Cavalcante; PONEZI, Alexandre Nunes; PASTORE, Gláucia Maria. Production of biosurfactant by *Bacillus subtilis* LB5a on a pilot scale using cassava wastewater as substrate. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 35, n. 9, p. 1071-1078, 2008.
- BELKHIR, Meriem; LOUHAB, K.; BOUGHERARA, S. Assessment Of The Environmental Impacts Resulting From The Presence Of Surface Agents In The Discharge From An Urban Water Cleaning Station In Algeria By Life Cycle Assessment Method. **Algerian Journal of Environmental Science and Technology**, v. 8, n. 3, 2022.
- BENEDET JÚNIOR, Gilberto *et al.* **Avaliação de intercetezas em inventários do ciclo de vida**. 2007. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Florianópolis.
- BERNA, J. L.; CAVALLI, L.; RENTA, C. Bestandsaufnahme zur Erstellung einer Ökobilanz der LAS-Produktion in Europa/A Life-Cycle Inventory for the Production of Linear Alkylbenzene Sulphonates in Europe. **Tenside Surfactants Detergents**, v. 32, n. 2, p. 122-127, 1995.
- BIPM, IEC; IFCC, ILAC; IUPAC, IUPAP. Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. **Propagation of distributions using a Monte Carlo method**, 2008.

BOC Sciences, Ltd. Disponível em: <https://www.bocsci.com/surfactin-cas-24730-31-2-item-212480.html>. Acesso em: 15 de setembro de 2023.

BOGNOLO, Giulio. Biosurfactants as emulsifying agents for hydrocarbons. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 152, n. 1-2, p. 41-52, 1999.

BRIEM, Ann-Kathrin *et al.* Environmental impacts of biosurfactants from a life cycle perspective: A systematic literature review. **Biosurfactants for the Biobased Economy**, p. 235-269, 2022.

BRUMANO, Larissa Pereira; SOLER, Matheus Francisco; DA SILVA, Silvio Silvério. **Recent advances in sustainable production and application of biosurfactants in Brazil and Latin America**. *Industrial Biotechnology*, v. 12, n. 1, p. 31-39, 2016.

BURGHOFF, B. Foam fractionation applications. **Journal of Biotechnology**, [s. l.], v. 161, n.2, p. 126–137, 2012.

CALVO, H. *et al.* The role of iturin A from *B. amyloliquefaciens* BUZ-14 in the inhibition of the most common postharvest fruit rots. **Food microbiology**, v. 82, p. 62-69, 2019.

CAMEOTRA, S. S.; MAKKAR, R. S. Recent applications of biosurfactants as biological and immunological molecules. **Current Opinion in Microbiology**, 2004. v. 7, n. 3, p. 262– 266.

CHEN, Liang *et al.* Genome shuffling of *Bacillus velezensis* for enhanced surfactin production and variation analysis. **Current Microbiology**, v. 77, p. 71-78, 2020.

CHEN, Wei-Chuan; JUANG, Ruey-Shin; WEI, Yu-Hong. **Applications of a lipopeptide biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms**. *Biochemical Engineering Journal*, v. 103, p. 158-169, 2015.

CHTIOUI, O. *et al.* Rotating discs bioreactor, a new tool for lipopeptides production. **Process Biochemistry**, [s. l.], v. 47, n. 12, p. 2020–2024, 2012.

CIROTH, Andreas *et al.* Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix inecoinvent. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1338-1348, 2016.

CIURKO, Dominika *et al.* Sustainable production of biosurfactant from agro-industrial oil wastes by *Bacillus subtilis* and its potential application as antioxidant and ACE inhibitor. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 18, p. 10824, 2022.

COUTTE, F. *et al.* Production of surfactin and fengycin by *Bacillus subtilis* in a bubbleless membrane bioreactor. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 87, n. 2, p. 499–507, 2010.

COUTTE, François *et al.* Microbial lipopeptide production and purification bioprocesses, current progress and future challenges. **Biotechnology Journal**, v. 12, n. 7, p. 1600566, 2017.

CURRAN, Mary Ann *et al.* **Life-cycle assessment**: inventory guidelines and principles. Cincinnati: CRC Press, 2020.

CZINKÓCZKY R, *et al.* Prediction of surfactin fermentation with *Bacillus subtilis* DSM10 by response surface methodology optimized artificial neural network. **Cell Biochemistry and Function**, 2023; 41(2): 234-242.

CZINKÓCZKY, Réka; NÉMETH, Áron. Techno-economic assessment of *Bacillus* fermentation to produce surfactin and lichenysin. **Biochemical Engineering Journal**, v. 163, p. 107719, 2020a.

CZINKÓCZKY, Réka; NÉMETH, Áron. The effect of pH on biosurfactant production by *Bacillus subtilis* DSM10. **Hungarian Journal of Industry and Chemistry**, p. 37-43, 2020b.

Daryasafar A, Jamialahmadi M, Moghaddam MB, Moslemi B. Using biosurfactant producing bacteria isolated from an Iranian oil field for application in microbial enhanced oil recovery. **Petroleum Science and Technology**, 2016; 34:739–746.

DATTA, Poulami; TIWARI, Pankaj; PANDEY, Lalit M. Isolation and characterization of biosurfactant producing and oil degrading *Bacillus subtilis* MG495086 from formation water of Assam oil reservoir and its suitability for enhanced oil recovery. **Bio-resource technology**, v. 270, p. 439-448, 2018.

DATTA, Poulami; TIWARI, Pankaj; PANDEY, Lalit M. Oil washing proficiency of biosurfactant produced by isolated *Bacillus tequilensis* MK 729017 from Assam reservoir soil. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 195, p. 107612, 2020.

DE FRANÇA, Ítalo Waldimiro Lima *et al.* Production of surfactin by *Bacillus subtilis* LAMI005 and evaluation of its potential as tensoactive and emulsifier. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 100, n. 7, p. 1502-1515, 2022.

DE OLIVEIRA SCHMIDT, Vanessa Kristine *et al.* Biosurfactant inducers for enhanced production of surfactin and rhamnolipids: an overview. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 37, n. 2, p. 21, 2021.

DE OLIVEIRA, Darlane Wellen Freitas *et al.* Kinetic study of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* LAMI005 grown in clarified cashew apple juice. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 101, p. 34-43, 2013.

DEMARCO, Maggie; FORTIER, Marie-Odile P. Functional unit choice in space conditioning Life Cycle Assessment: Review and recommendations. **Energy and Buildings**, v. 255, p. 111626, 2022.

DERESZEWSKA, Alina; CYTAWA, Stanisław. Granulometric analysis to estimate influence of anionic surfactant on activated sludge structure. **Ecological Chemistry and Engineering A-Chemia i Inżynieria Ekologiczna A**, v. 22, p. 51-61, 2015.

Dhanarajan G, Rangarajan V, Bandi C, Dixit A, Das S, Ale K, Sen R. Biosurfactant-biopolymer driven microbial enhanced oil recovery (MEOR) and its optimization by an ANN-GA hybrid technique. **Journal of Biotechnology**, 2017; 256:46–56.

DRAKONTIS, Constantina Eleni; AMIN, Samiul. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. **Current Opinion in Colloid e Interface Science**, v. 48, p. 77-90, 2020.

DURVAL, Italo José B. *et al.* Production, characterization, evaluation and toxicity assessment of a *Bacillus cereus* UCP 1615 biosurfactant for marine oil spills bioremediation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 157, p. 111357, 2020.

EBADIPOUR, N. *et al.* Optimization of low-cost biosurfactant production from agricultural residues through response surface methodology. **Preparative Biochemistry and Biotechnology**, v. 46, n. 1, p. 30-38, 2016.

ELIAS, Andrew M. *et al.* Techno-economic-environmental analysis of sophorolipid biosurfactant production from sugarcane bagasse. **Industrial e Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 27, p. 9833-9850, 2021.

ELSHAFIE, Abdulkadir E. *et al.* Sophorolipids production by *Candida bombicola* ATCC 22214 and its potential application in microbial enhanced oil recovery. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 1324, 2015.

EVANGELISTA, P. P. A. **Desempenho ambiental na construção civil: parâmetros para aplicação da avaliação do ciclo de vida em edificações residenciais brasileiras.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2017

FANTKE, Peter *et al.* Exposure and toxicity characterization of chemical emissions and chemicals in products: global recommendations and implementation in USEtox. **The international journal of life cycle assessment**, v. 26, p. 899-915, 2021.

FARZAND, R. *et al.* Fermentation and downstream processing of surfactin: a review. **Process Biochemistry**, v. 88, p. 223-234, 2020.

FELIPE, Lorena de Oliveira; DIAS, Sandra de Cássia. Surfactantes sintéticos e biosurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova da Escola**, v. 39, n. 03, p. 228-236, 2017.

FELIX, Anne Kamilly Nogueira *et al.* Purification and characterization of a biosurfactant produced by *Bacillus subtilis* in cashew apple juice and its application in the remediation of oil-contaminated soil. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 175, p. 256-263, 2019.

FENIBO, Emmanuel Oliver; DOUGLAS, Salome Ibietela; STANLEY, Herbert Okechukwu. A review on microbial surfactants: production, classifications, properties and characterization. **Journal of Advances in Microbiology**, v. 18, n. 3, p. 1-22, 2019.

FERRARI, Anna Maria *et al.* Dynamic life cycle assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and Enterprise resource planning (ERP) in an industry 4.0 environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125314, 2021.

GANESAN, Neela Gayathri; RANGARAJAN, Vivek. A comparative study on surfactin production from various fruit juices for diverse applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 2660-2667, 2023.

GEISSLER, Mareen *et al.* Lipopeptide biosurfactants from *Bacillus* species. In: **Biobased surfactants**. AOCS Press, 2019. p. 205-240.

Gong G, Zheng Z, Chen H, Yuan C, Wang P, Yao L, Yu Z. Enhanced production of surfactin by *Bacillus subtilis* E8 mutant obtained by ion beam implantation. **Food Technology and Biotechnology**, 2009; 47:27–3.

GUDIÑA, Eduardo J. *et al.* Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* using corn steep liquor as culture medium. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 59, 2015.

GUDIÑA, Eduardo J.; TEIXEIRA, José A. *Bacillus licheniformis*: The unexplored alternative for the anaerobic production of lipopeptide biosurfactants?. **Biotechnology Advances**, v. 60, p. 108013, 2022.

GUINÉE, Jeroen B. Selection of impact categories and classification of LCI results to impact categories. **Life Cycle Impact Assessment**, p. 17-37, 2015.

GURJAR, Jigar; SENGUPTA, Bina. Production of surfactin from rice mill polishing residue by submerged fermentation using *Bacillus subtilis* MTCC 2423. **Bioresource technology**, v. 189, p. 243-249, 2015.

GÜRKÖK, Sümeyra; ÖZDAL, Murat. Microbial Biosurfactants: Properties, Types, and Production. **Anatolian Journal of Biology**, v. 2, n. 2, p. 7-12, 2021.

Haddad N, Gang H, Liu J, Maurice Mbadinga S, Mu B. Optimization of surfactin production by *Bacillus subtilis* HSO121 through Plackett-Burman and response surface method. **Protein and Peptide Letters**, 2014; 21:885–893.

HASSAN, Mariam *et al.* Optimization of rhamnolipid production by biodegrading bacterial isolates using Plackett–Burman design. **International journal of biological macromolecules**, v. 82, p. 573-579, 2016.

HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving. **Life cycle assessment**. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3> Book, 2018.

HENKEL, Marius *et al.* Production of microbial biosurfactants: Status quo of rhamnolipid and surfactin towards large-scale production. **Biotechnology journal**, v. 12, n. 7, p. 1600561, 2017.

HISCHIER, Roland *et al.* Implementation of life cycle impact assessment methods. **Final report ecoinvent v2**, v. 2, 2010.

HU, Fangxiang; LIU, Yuyue; LI, Shuang. Rational strain improvement for surfactin production: enhancing the yield and generating novel structures. **Microbial cell factories**, v. 18, p. 1-13, 2019.

HU, Meizhong *et al.* An efficient method for the recovery and separation of surfactin from fermentation broth by extraction-back extraction. **Process Biochemistry**, v. 114, p. 59-65, 2022.

HU, Xiaomeng *et al.* Bioconversion of food waste to produce industrial-scale sophorolipid syrup and crystals: dynamic life cycle assessment (dLCA) of emerging biotechnologies. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125474, 2021.

HUIJBREGTS, Mark AJ *et al.* ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: **characterization**. 2016.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibict/pt-br/assuntos/informacao-cientifica/avaliacao-do-ciclo-de-vida-acv>. Acesso em: 01 maio 2023.

JAFARI, Faezeh; HASSANZADEH, Nasrin. **Ecological Risk Assessment of Molecular Marker of Sewage Discharge (LASs) in the Abbas Abad Rivers in Hamadan**. Iran-Water Resources Research, v. 16, n. 1, p. 229-239, 2020.

JAHAN, Ruksana *et al.* Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. **Advances in colloid and interface science**, v. 275, p. 102061, 2020.

Jamal P, Alam MZ, Zainuddin EA, Nawawi AW. Production of biosurfactant in 2L bioreactor using sludge palm oil as a substrate. **IIUM Engineering Journal**, 2011; 12.

JANEK, Tomasz *et al.* Sustainable surfactin production by *Bacillus subtilis* using crude glycerol from different wastes. **Molecules**, v. 26, n. 12, p. 3488, 2021.

JIANG, Chunmei *et al.* *Bacillus subtilis* inhibits *Aspergillus carbonarius* by producing iturin A, which disturbs the transport, energy metabolism, and osmotic pressure of fungal cells as revealed by transcriptomics analysis. **International journal of food microbiology**, v. 330, p. 108783, 2020.

JIMOH, Abdullahi Adekilekun; LIN, Johnson. Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. **Ecotoxicology and Environmental safety**, v. 184, p. 109607, 2019.

JOHNSON, Phillip *et al.* Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. **Advances in colloid and interface science**, v. 288, p. 102340, 2021.

JONES-COSTA, Monica *et al.* Cardiac biomarkers as sensitive tools to evaluate the impact of xenobiotics on amphibians: the effects of anionic surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS). **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 151, p. 184-190, 2018.

JOSHI, Sanket J.; GEETHA, S. J.; DESAI, Anjana J. Characterization and application of biosurfactant produced by *Bacillus licheniformis* R2. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 177, p. 346-361, 2015.

JOSHI, Sanket; BHARUCHA, Chirag; DESAI, Anjana J. Production of biosurfactant and antifungal compound by fermented food isolate *Bacillus subtilis* 20B. **Biore-source technology**, v. 99, n. 11, p. 4603-4608, 2008.

KANDASAMY, Ramani *et al.* New trends in the biomanufacturing of green surfactants: biobased surfactants and biosurfactants. In: **Next Generation Biomanufacturing Technologies**. American Chemical Society, 2019. p. 243-260.

KARLAPUDI, Abraham Peele *et al.* Role of biosurfactants in bioremediation of Oil Pollution—a review. **Petroleum**, v. 7, n. 2, p. 230, 2021.

KHALIL, Mostafa; LIU, Yang. Greywater biodegradability and biological treatment technologies: A critical review. **International Biodeterioration e Biodegradation**, v. 161, p. 105211, 2021.

KIM, J. N. *et al.* High-yield production of surfactin with superior surface activity from a genetically engineered *Bacillus subtilis*. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 115, n. 8, p. 2037-2046, 2018.

KISIL, O. V. *et al.* Surfactin: Its Biological Activity and Possibility of Application in Agriculture. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 59, n. 1, p. 1-13, 2023.

KOPSAHELIS, Alexandros *et al.* Gate-to-gate life cycle assessment of biosurfactants and bioplasticizers production via biotechnological exploitation of fats and waste oils. **Journal of Chemical Technology e Biotechnology**, v. 93, n. 10, p. 2833-2841, 2018.

KRACHT, MAREN *et al.* Antiviral and hemolytic activities of surfactin isoforms and their methyl ester derivatives. **The Journal of antibiotics**, v. 52, n. 7, p. 613-619, 1999.

KUMAR, P. Senthil *et al.* A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: Types, production, properties and its application in the bioremediation process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 407, p. 124827, 2021.

KURUP, Pratibha S. Biosurfactants an ecofriendly tool, a review. **International Journal of Futuristic Innovation in Engineering, Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 162-172, 2023.

LARINI, Mariana Munhoz *et al.* **Surfactina: estrutura, aplicações e fatores envolvidos em sua produção**. Evidência, v. 17, n. 2, p. 105-118, 2017.

LEONCIO, BRUNO TORRES. **Uso de macroinvertebrado aquático para monitoramento da toxicidade de reatores de leito fluidificado na remoção de LAS de água residuária de lavanderia comercial**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019

LI, Yi; HE, Qing; YANG, Yongliang. Sorting study on the toxicity screening of a single pollutant towards enterprises based on the USEtox model and textile industry cases. **The Journal of The Textile Institute**, v. 113, n. 10, p. 2116-2127, 2022.

LIMA, A. M. F. **Impactos e oportunidades de melhorias ambientais na cadeia produtiva do algodão para produção de biodiesel**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2017.

LUCCHETTI, Maria G. *et al.* The role of environmental evaluation within circular economy: an application of life cycle assessment (LCA) method in the detergents sector. **Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti**, v. 23, n. 2, p. 238-257, 2019.

Luna JM, Rufino RD, Albuquerque CDC, Sarubbo LA, Campos-Takaki GM. Economic optimized medium for tensio-active agent production by *Candida sphaerica* UCP0995 and application in the removal of hydrophobic contaminant from sand. **International Journal of Molecular Sciences**, 2011; 12.

MABROUK, Mokhtar M.; HAMED, Nouran A.; MANSOUR, Fotouh R. Physicochemical and electrochemical methods for determination of critical micelle concentrations of surfactants: A comprehensive review. **Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly**, v. 153, n. 2, p. 125-138, 2022.

MAGALHÃES, Augusto Vieira. **Análise técnico-econômica preliminar do processo de produção de surfactina**. Dissertação (Mestrado) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

MAIA, Patricia Cristina de Veras Souza *et al.* **Produção e aplicação de bioemulsificante isolado de *Bacillus subtilis* UCP 0146 por fermentação submersa em manipueira**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MD BADRUL HISHAM, Nurul Hanisah *et al.* Production of biosurfactant produced from used cooking oil by *Bacillus sp. HIP3* for heavy metals removal. **Molecules**, v. 24, n. 14, p. 2617, 2019.

MEENA, K. R. *et al.* Two factor at a time approach by response surface methodology to aggrandize the *Bacillus subtilis* KLP2015 surfactin lipopeptide to use as antifungal agent. **Journal of King Saud University - Science**, 2020. v. 32, n. 1, p. 337–348.

MEENA, K. R.; KANWAR, S. S. Lipopeptides as the antifungal and antibacterial agents: Applications in food safety and therapeutics. **BioMed Research International**, 2015. v. 2015.

MEENA, K. R.; SHARMA, A.; KANWAR, S. S. Antitumoral and Antimicrobial Activity of Surfactin Extracted from *Bacillus subtilis* KLP2015. **International Journal of Peptide Research and Therapeutics**, 2020. v. 26, n. 1, p. 423–433.

MEI, Yuwei *et al.* Enhanced surfactin fermentation via advanced repeated fed-batch fermentation with increased cell density stimulated by EDTA–Fe (II). **Food and Bioproducts Processing**, v. 127, p. 288-294, 2021.

MENEZES, Soryane de Paula *et al.* **Degradação do Linear Alquilbenzeno Sulfonado (LAS) em Reator Batelada Sulfetogênico e Metanogênico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MERCK. **MilliporeSigma**. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/product/sigma/s3523>. Acesso em: 15 set. 2023.

MOHANTY, Swayansu Sabyasachi *et al.* A critical review on various feedstocks as sustainable substrates for biosurfactants production: a way towards cleaner production. **Microbial cell factories**, v. 20, n. 1, p. 1-13, 2021.

MOSHTAGH, Bahareh; HAWBOLDT, Kelly; ZHANG, Baiyu. Optimization of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* N3-1P using the brewery waste as the carbon source. **Environmental technology**, 2018.

MOTTERAN, Fabricio; VARESCHE, Maria Bernadete Amâncio; LARA-MARTIN, Pablo A. Assessment of the aerobic and anaerobic biodegradation of contaminants of emerging concern in sludge using batch reactors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 56, p. 84946-84961, 2022.

MOUSAVI, Seyyed Alireza; KHODADOOST, Farank. Effects of detergents on natural ecosystems and wastewater treatment processes: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 26439-26448, 2019.

MUKHERJEE, Ashis K.; DAS, Kishore. Correlation between diverse cyclic lipopeptides production and regulation of growth and substrate utilization by *Bacillus subtilis* strains in a particular habitat. **FEMS microbiology ecology**, v. 54, n. 3, p. 479-489, 2005.

MÜLNER, Pascal *et al.* Profiling for bioactive peptides and volatiles of plant growth promoting strains of the *Bacillus subtilis* complex of industrial relevance. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 1432, 2020.

MUNGRAY, Arvind Kumar; KUMAR, Pradeep. Anionic surfactants in treated sewage and sludges: risk assessment to aquatic and terrestrial environments. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 8, p. 2919-2929, 2008.

NAGTODE, Vaishnavi S. *et al.* Green Surfactants (Biosurfactants): A Petroleum-Free Substitute for Sustainability— Comparison, Applications, Market, and Future Prospects. **ACS omega**, v. 8, n. 13, p. 11674-11699, 2023.

NAIDOO, Sasha. Commentary on the contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **South African Journal of Science**, v. 118, n. 9-10, p. 1-4, 2022.

NANJUNDAN, Jaivel *et al.* Antimicrobial activity and spectroscopic characterization of surfactin class of lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* SR1. **Microbial pathogenesis**, v. 128, p. 374-380, 2019.

NEMECEK, Thomas *et al.* Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. **Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART**, 2011.

NEVES, Talles Iwasawa *et al.* Environmental evaluation of the life cycle of elephant

grass fertilization—*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone—using chemical fertilization and biosolids. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, p. 1-8, 2018.

NG, Yan Jer *et al.* Recent advances of biosurfactant for waste and pollution bioremediation: Substitutions of petroleum-based surfactants. **Environmental Research**, v. 212, p. 113126, 2022.

NIU, Yongwu *et al.* Production and characterization of a new glycolipid, mannosylerythritol lipid, from waste cooking oil biotransformation by *Pseudozyma aphidis* ZJUDM34. **Food science & nutrition**, v. 7, n. 3, p. 937-948, 2019.

NURFARAHIN, Abdul Hamid; MOHAMED, Mohd Shamzi; PHANG, Lai Yee. Culture medium development for microbial-derived surfactants production—an overview. **Molecules**, v. 23, n. 5, p. 1049, 2018.

OLIVEIRA, Maria Clara Brandt Ribeiro de. **Avaliação de ciclo de vida de embalagens plásticas de óleo lubrificante**: um estudo de caso. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, Maria Clara Morais de. **Avaliação de biossurfactantes produzidos por *Bacillus sp. TIM10* em formulação de shampoo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

PALERMO, Giuseppe Cernicchiaro. **Avaliação de ciclo de vida de cenários para 2030 da indústria brasileira de cimento**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021

PATOUILLARD, Laure *et al.* Prioritizing regionalization efforts in life cycle assessment through global sensitivity analysis: a sector meta-analysis based on ecoinvent v3. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 2238-2254, 2019.

PEDRAZA, Jorge Morales. Chapter 1-general overview of the energy sector in the north America region. *Conventional Energy in North America*, **Elsevier**. 2019

PEREIRA, Alyson G. *et al.* Optimization of biosurfactant production using waste from biodiesel industry in a new membrane assisted bioreactor. **Process Biochemistry**, v. 48, n. 9, p. 1271-1278, 2013.

PEREIRA, Jorge FB *et al.* Optimization and characterization of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* isolates towards microbial enhanced oil recovery applications. **Fuel**, v. 111, p. 259-268, 2013.

PÉREZ-LÓPEZ, M. E.; ARREOLA-ORTIZ, A. E.; ZAMORA, P. Malagón. Evaluation of detergent removal in artificial wetlands (biofilters). **Ecological engineering**, v. 122, p. 135-142, 2018.

PIRETE, Luciana de Melo *et al.* Retenção do alquilbenzeno linear sulfonado e fármacos por sistemas de membranas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

PRASAD, P. Siva *et al.* Surfactant-assisted synthesis of hydroxyapatite particles: a comprehensive review. **Journal of Materials Science**, v. 58, n. 14, p. 6076-6105, 2023.

QI, Xiaohua *et al.* A review on surfactin: molecular regulation of biosynthesis. **Archives of Microbiology**, v. 205, n. 9, p. 313, 2023.

QIN, Yuwei; CUCURACHI, Stefano; SUH, Sangwon. Perceived uncertainties of characterization in LCA: a survey. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, p. 1846-1858, 2020.

RANGARAJAN, V.; DHANARAJAN, G.; SEN, R. Improved performance of cross-flow ultrafiltration for the recovery and purification of Ca²⁺ conditioned lipopeptides in diafiltration mode of operation. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 454, p. 436–443, 2014.

RASHEDI, A.; KHANAM, Taslima. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 23, p. 29075-29090, 2020.

REBELLO, Sharrel *et al.* Comparative life-cycle analysis of synthetic detergents and biosurfactants—an overview. **Refining biomass residues for sustainable energy and bioproducts**, p. 511-521, 2020.

RIBEIRO, Beatriz Galdino; GUERRA, Jenyffer M. Campos; SARUBBO, Leonie Asfora. Potential food application of a biosurfactant produced by *Saccharomyces cerevisiae* URM 6670. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 8, p. 434, 2020.

ROCHA PM. Produção de surfactina por *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 utilizando melão de cana como substrato. Dissertação de Mestrado, UFRN, 2017.

ROCHA, Patrícia Maria *et al.* Kinetic study and characterization of surfactin production by *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 using sugarcane molasses as carbon source. **Preparative Biochemistry e Biotechnology**, v. 51, n. 3, p. 300-308, 2021.

RODRIGUES, Ligia R. Microbial surfactants: fundamentals and applicability in the formulation of nano-sized drug delivery vectors. **Journal of colloid and interface science**, v. 449, p. 304-316, 2015.

ROSENBAUM, Ralph K. *et al.* Life cycle impact assessment. **Life cycle assessment: theory and practice**, v.1, p. 167-270, 2018.

SA, R.-B. *et al.* Purification and structural characterization of fengycin homologues produced by *Bacillus subtilis* from poplar wood bark. **Australasian Plant Pathology**, v. 47, p. 259-268, 2018.

SABLAYROLLES, Caroline *et al.* Trace determination of linear alkylbenzene sulfonates: Application in artificially polluted soil—Carrots system. **International Journal of Analytical Chemistry**, v. 2009, 2009.

SAHOO, Kamalakanta; BERGMAN, Richard; KHATRI, Poonam. Cradle-to-Grave Life-Cycle Assessment of Cellulosic Fiberboard. **Recent Progress in Materials**, v. 3, n. 4, p. 1-28, 2021.

SAKTHIPRIYA N, *et al.* Impact of biosurfactants, surfactin, and rhamnolipid produced from *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa*, on the enhanced recovery of crude Oil and Its comparison with commercial surfactants, v. 35, n. 12, p. 9883–9893, 2021.

SANCHES, Michele Alves *et al.* Production of biosurfactants by Ascomycetes. **International Journal of Microbiology**, v. 2021, 2021.

SANTOS, Danyelle Khadydja F. *et al.* Biosurfactants: multifunctional biomolecules of the 21st century. **International journal of molecular sciences**, v. 17, n. 3, p. 401, 2016.

SAOUTER, Erwan *et al.* Environmental Footprint: Update of Life Cycle Impact Assessment methods—Ecotoxicity freshwater, human toxicity cancer, and non-cancer. **European Union, Luxembourg**, 2018.

SARUBBO, Leonie A. *et al.* Biosurfactants: Production, properties, applications, trends, and general perspectives. **Biochemical Engineering Journal**, v. 181, p. 108377, 2022.

SATPUTE, S. K. *et al.* A review of biosurfactant production and purification using membrane technology. **Journal of environmental management**, v. 181, p. 1-20, 2016.

SCHONHOFF A, *et al.* Environmental impacts of biosurfactant production based on substrates from the sugar industry. **ACS Sustainable Chemistry e Engineering**, 2022; 10(29): 9345-9358.

SEGOVIA-HERNÁNDEZ, Juan Gabriel *et al.* Tackling sustainability challenges in Latin America and Caribbean from the chemical engineering perspective: A literature review in the last 25 years. **Chemical Engineering Research and Design**, 2022.

SEYEDSALEHI, M. *et al.* Performance evaluation of several sequencing batch biofilm reactors with movable bed in treatment of linear alkyl benzene sulfonate in urban wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 6763-6772, 2019.

SHABAN, Samy M.; KANG, Joohoon; KIM, Dong-Hwan. Surfactants: Recent advances and their applications. **Composites Communications**, v. 22, p. 100537, 2020.

Shah MUH, Sivapragasam M, Moniruzzaman M, Talukder MMR, Yusup SB, Goto M. Production of sophorolipids by *Starmerella bombicola* yeast using new hydrophobic substrates. **Biochemical Engineering Journal**, 2017; 127:60–7.

SILVA, Nathalia Maria P. Rocha e *et al.* Natural surfactants and their applications for heavy oil removal in industry. **Separation e Purification Reviews**, v. 48, n. 4, p. 267-281, 2019.

SILVA, Victor Duarte da. **Avaliação do ciclo de vida do processo de fermentação para produção de surfactina produzida por *Bacillus subtilis* UFPEDA 438 utilizando melão de cana-de-açúcar como substrato.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

TALWAR, Nishtha; HOLDEN, Nicholas M. The limitations of bioeconomy LCA studies for understanding the transition to sustainable bioeconomy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, n. 5, p. 680-703, 2022.

THANNIMALAY, Letchumi; YUSOFF, Sumiani. Comparative analysis of environmental evaluation of LAS and MES in detergent—A Malaysian case study. **World Applied Sciences Journal**, v. 31, n. 9, p. 1635-1647, 2014.

THAVASI, Rengathavasi; BANAT, Ibrahim M. Downstream processing of microbial biosurfactants. **Microbial biosurfactants and their environmental and industrial applications**, p. 16-27, 2019.

THÉATRE, Ariane *et al.* The surfactin-like lipopeptides from *Bacillus spp.*: Natural biodiversity and synthetic biology for a broader application range. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 623701, 2021.

UGAYA, C. M. L.; ALMEIDA NETO, J. A.; FIGUEIREDO, MCB de. Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro. **Relatório da Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida-RAICV. Brasília: IBICT/MCT**, 2019.

UZOIGWE, Chibuzo *et al.* Bioemulsifiers are not biosurfactants and require different screening approaches. **Frontiers in microbiology**, v. 6, p. 245, 2015.

VAN DER SLUIJS, Jeroen P. *et al.* Combining quantitative and qualitative measures of uncertainty in model-based environmental assessment: the NUSAP system. **Risk Analysis: An International Journal**, v. 25, n. 2, p. 481-492, 2005.

VAN HOOFF, Gert *et al.* Ecotoxicity impact assessment of laundry products: a comparison of USEtox and critical dilution volume approaches. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, p. 803-818, 2011.

VANDANA P, Singh D. Review on biosurfactant production and its application. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 2018; 7: 4228–4241.

VARJANI, Sunita J.; UPASANI, Vivek N. Biodegradation of petroleum hydrocarbons by oleophilic strain of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514. **Bioresource technology**, v. 222, p. 195-201, 2016.

- VERMA, Rahul *et al.* Enhanced production of biosurfactant by *Bacillus subtilis* RSL2 in semicontinuous bioreactor utilizing molasses as a sole substrate. **Journal of Biotechnology**, v. 362, p. 24-35, 2023.
- VERMA, Rahul; KUNDU, Lal Mohan; PANDEY, Lalit M. Enhanced melanoidin removal by amine-modified Phyllanthus emblica leaf powder. **Bioresource Technology**, v. 339, p. 125572, 2021.
- VICENTE, Renata *et al.* A prospection on membrane-based strategies for downstream processing of surfactin. **Chemical Engineering Journal**, v. 415, p. 129067, 2021.
- VICENTE, Renata *et al.* **Desenvolvimento de membrana cerâmica de ultrafiltração e aplicação na concentração de surfactina obtida utilizando manipueira como substrato**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- VIGHI, M. *et al.* Opinion on the potential for anaerobic biodegradability in marine and freshwater of Linear Alkylbenzene Sulphonates (LAS). **European Commission, SHEER**, 2020.
- VILLOTA-PAZ, Javier Mauricio; OSORIO-TEJADA, José Luis; MORALES-PINZÓN, Tito. Comparative life cycle assessment for the manufacture of bio-detergents. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 12, p. 34243-34254, 2023.
- VIMON S, ANGKANAPORN K, NUENGJAMNONG C. Evaluation of dietary probiotic (*Bacillus subtilis* KMP-BCP-1 and *Bacillus licheniformis* KMP-9) supplementation and their effects on broiler chickens in a tropical region. **Journal of Applied Animal Research**, 2020; 48(1): 365-371.
- WANG, Haihua *et al.* Gemini surfactant-assisted fabrication of graphene oxide/polyaniline towards high-performance waterborne anti-corrosive coating. **Applied Surface Science**, v. 565, p. 150581, 2021.
- WEIDEMA B. P. and WESNAES M. S. Data Quality Management for Life Cycle Inventories - An Example of Using Data Quality Indicators. **Journal of Cleaner Production** 4(3-4): 167-174. 1996.
- WILLENBACHER, Judit *et al.* Evaluation of different *Bacillus* strains in respect of their ability to produce Surfactin in a model fermentation process with integrated foam fractionation. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 98, p. 9623-9632, 2014.
- WITTGENS, Andreas; ROSENAU, Frank. On the road towards tailor-made rhamnolipids: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 102, p. 8175-8185, 2018.
- WU, Qun; ZHI, Yan; XU, Yan. Systematically engineering the biosynthesis of a green biosurfactant surfactin by *Bacillus subtilis* 168. **Metabolic engineering**, v. 52, p. 87-97, 2019.

WU, Yuan-Seng *et al.* Anticancer activities of surfactin and potential application of nanotechnology assisted surfactin delivery. **Frontiers in pharmacology**, v. 8, p. 761, 2017.

XIA, Li; WEN, Jianping. Available strategies for improving the biosynthesis of surfactin: a review. **Critical reviews in biotechnology**, p. 1-18, 2022.

YANG, Yi; TAO, Mengya; SUH, Sangwon. Geographic variability of agriculture requires sector-specific uncertainty characterization. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1581-1589, 2018.

YEH, Mao-Sung; WEI, Yu-Hong; CHANG, Jo-Shu. Bioreactor design for enhanced carrier-assisted surfactin production with *Bacillus subtilis*. **Process Biochemistry**, v. 41, n. 8, p. 1799-1805, 2006.

ZAH, R.; HISCHIER, R. **Life cycle inventories of detergents**. Final report ecoinvent data v2. 0, n. 12. 2007.

ZANOTTO, Aline Wasem *et al.* New sustainable alternatives to reduce the production costs for surfactin 50 years after the discovery. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 103, p. 8647-8656, 2019.

ZHANG, Dongliang *et al.* An efficient method for separation of surfactin from *Bacillus amyloliquefaciens fmb50* broth by flocculation. **Process Biochemistry**, v. 49, n. 7, p. 1182-1188, 2014.

ZHAO, H. *et al.* Biological activity of lipopeptides from *Bacillus*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2017. v. 101, n. 15, p. 5951–5960.

ZHEN, Cheng *et al.* Chemical structure, properties and potential applications of surfactin, as well as advanced strategies for improving its microbial production. **AIMS microbiology**, v. 9, n. 2, p. 195, 2023.

ZHEN, Cheng *et al.* Chemical structure, properties and potential applications of surfactin, as well as advanced strategies for improving its microbial production. **AIMS microbiology**, v. 9, n. 2, p. 195, 2023.

ZHI, Yan; WU, Qun; XU, Yan. Genome and transcriptome analysis of surfactin biosynthesis in *Bacillus amyloliquefaciens MT45*. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2017.

ZHOU, Jianan *et al.* Toxicity of linear alkylbenzene sulfonate to aquatic plant *Potamogeton perfoliatus* L. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 32303-32311, 2018.

ZOUARI, Raida *et al.* Cookies from composite wheat–sesame peels flours: Dough quality and effect of *Bacillus subtilis* SPB1 biosurfactant addition. **Food chemistry**, v. 194, p. 758-769, 2016.

PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

Apresentação de trabalhos em anais de eventos:

- a) SIINTEC 2023 (VIII International Symposium on Innovation and Technology): Apresentação do trabalho: “**Promoting Awareness of Solid Waste Disposal: Case Study On The Cosmetic Packaging Collection Initiative At A Public University**”
- b) SIINTEC 2022 (VIII International Symposium on Innovation and Technology): Apresentação do trabalho: “**Life Cycle Assessment of Linear Alkylbenzene Sulfonate Production: An Inventory Adaptation to The Brazilian Context**”
- c) SIINTEC 2021 (VII International Symposium on Innovation and Technology): Apresentação do trabalho “**The Paradox and Dynamic Between Sustainable Development and Corporate Performance**”
- d) IBEAS 2021 (XII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL): Apresentação do trabalho “**Avaliação de ciclo de vida no setor de saneantes: uma revisão sistemática**”
- e) SAPCT 2022 (VII Seminário de Avaliação de Pesquisa Científica e Tecnológica): Apresentação do trabalho “**Avaliação do ciclo de vida da produção de linear alquilbenzeno sulfonato**”.

Artigos publicados:

- a) BARRETO, Óliver Silva Costa *et al.* Life Cycle Assessment of Linear Alkylbenzene Sulfonate Production: An Adaptation to the Brazilian Context. **Journal of Bioengineering, Technologies and Health**, v. 6, n. 1, p. 38-44, 2023.
- b) BARRETO, Óliver Silva Costa *et al.* The Paradox and Dynamic Between Sustainable Development and Corporate Performance. **Journal of Bioengineering, Technologies And Health**, v. 4, n. 4, p. 141-146, 2021.

Artigo aceito para publicação:

- a) BARRETO, Óliver Silva Costa *et al.* O contexto das motos no Brasil: emissões geradas, seus efeitos e possíveis soluções no setor. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 27, 2024.

Cursos complementares:

- a) Análise de Ciclo de Vida [ACV] (40h). Universidade Federal da Bahia, UFBA, Brasil.
- b) Avaliação de Ciclo de Vida [ACV] (8h). Conceitos Fundamentais e Estudos de Caso. Programa de Engenharia Química da COPPE, UFRJ, Brasil.

APÊNDICE A – Procedimentos de Pesquisa

Coleta de materiais de análise: foram realizadas segundo o critério de disponibilidade, via web: foram selecionadas as fontes de indexação *Science Direct*, *Web of Science* e *SciELO*, definindo todos os bancos de dados disponíveis nas fontes em que a escolha é possível.

Strings de busca: As *strings* de busca foram subdivididas em três domínios, a fim de focalizar as temáticas buscadas e abranger mais resultados pertinentes : ("*life cycle assessment*") OR (*LCA*) OR ("ciclo de vida") OR (*ACV*); (*surfactant*) OR (*biosurfactant*) OR (*detergent*); (*environmental*) OR ("meio ambiente") OR (*impact**). Esses domínios foram interconectados com a utilização do operador booleano "AND" unindo-os em busca avançada.

Controle da busca: foram considerados artigos submetidos a revisão por pares, sem distinção de idioma, sem definição de período de publicação (até setembro de 2021) e que apresentaram mecanismos de Avaliação de Ciclo de Vida na área de Saneantes e afins. Para tal, fez-se necessário atribuir critérios de inclusão e exclusão primários das fontes encontradas, conforme Tabela A.

Operacionalização: Os resultados das buscas supracitadas foram depositados na plataforma online *Rayyan*, desenvolvido pelo *Qatar Computing Research Institute* (QCRI)¹, que apresenta uma ferramenta auxiliar para gestão de revisão compartilhada entre os autores, arquivamento dos resultados encontrados, remoção de duplicatas e atribuição dos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos.

Análise preliminar dos resultados: foi feita mediante a leitura de título e resumo dos trabalhos encontrados, sendo classificados de acordo aos critérios de inclusão e exclusão. Para os artigos em que houve dúvidas quanto à classificação, os autores em quantidade ímpar, elegeram a classificação.

Triagem: O conjunto dos resultados incluídos foram reavaliados em carácter eliminatório, quanto a tipologia do documento, adequação à proposta e processo de revisão

por pares, e em carácter classificatório, considerando o fator de impacto (IF) do periódico científico e ponderado por relevância em adequação da proposta do estudo, para que então, exposto na presente pesquisa os resultados principais dos artigos selecionados.

Quadro A – Critérios Empregados

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	SIMBOLOGIA
Trabalhos que apresentam uma revisão sobre Avaliação de Ciclo de Vida voltados para Surfactantes e Biossurfactantes	A +
Trabalhos que utilizam de ACV na área de Saneantes, com foco nos produtos Surfactantes e Biossurfactantes	B +
Estudos de Categorias de Impacto de ACV aplicados em estudos relacionados a Surfactantes e Biossurfactantes	C +
CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO	SIMBOLOGIA
Não são artigos ou foram publicados como artigos curtos ou pôsteres	A -
Trabalhos que não são sobre Categorias de Impacto de ACV e não englobam a área de Saneantes	B -
Trabalhos que apresentam avaliações sem apresentar o método utilizado	C -
Trabalhos em que não se possa acessar por completo	D -
Artigos duplicados em busca	E -

Ao total foram resgatados 145 resultados, 28 desses foram identificados como duplicatas pelo *Rayyan* e descartados posteriormente, dos 117 restantes 106 foram analisados e excluídos por não corresponder aos critérios estabelecidos, e 11 artigos foram incluídos por atender os critérios.

Os resultados encontrados estão categorizados quanto aos critérios adotados, Gráfico A, sendo de fácil percepção visual que o critério adotado como B- (trabalhos que não são sobre Categorias de Impacto de ACV e não englobam a área de Saneantes) desclassificou mais da metade dos artigos encontrados.

A participação dos critérios para a seleção dos artigos pode ser percebida quantitativamente e em função da situação de inclusão e exclusão no Gráfico B. Pode ser percebido pelo critério E- que 19 desses artigos encontrados foram excluídos por serem duplicatas não identificadas pelo *Rayyan*, 02 artigos foram excluídos por não serem artigos (A-), o critérios C- e D- não foram identificados preliminarmente, o que significa dizer que foi obtido o acesso a todos os artigos e em primeira análise todos apresentaram a metodologia adotada.

Gráfico A - Distinção percentual por critério

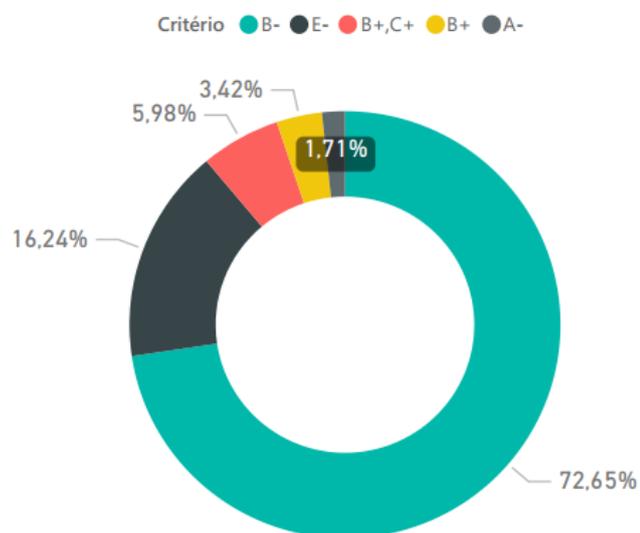
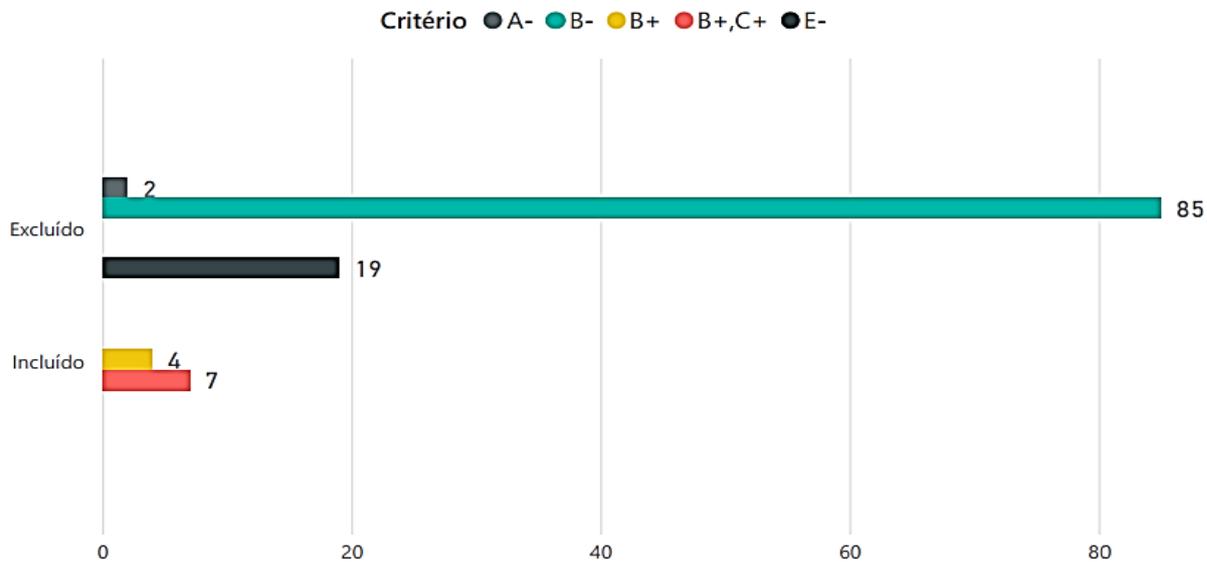


Gráfico B. Situação dos artigos por critério



QUADRO B - Resultados mais relevantes dos artigos selecionados

TÍTULO	ANO	REFERÊNCIA	RESULTADOS MAIS RELEVANTES
Analysis of risk trade-off relationships between organic solvents and aqueous agents: case study of metal cleaning processes	2011	KIKUCHI, KIKUCHI & HIRAO, 2011.	O objetivo deste estudo foi analisar as relações de trade-off de risco entre solventes orgânicos e detergentes aquosos no estudo de caso de processos de limpeza de metais. Três cenários usando solventes clorados e cinco cenários usando detergentes aquosos foram desenvolvidos e avaliados. Os impactos analisados foram: Desperdício, Ecotoxicidade, Toxicidade humana, Criação fotoquímica de ozônio, Eutrofização, Poluição do ar urbano, Acidificação, Destruição do ozônio e Potencial de aquecimento global. Os resultados comparativos mostram que a criação fotoquímica de ozônio é responsável por uma grande fração do impacto dos solventes orgânicos, enquanto a eutrofização é o impacto mais significativo dos detergentes aquoso. O cenário de menor impacto global foi relativo a detergentes aquosos, entretanto seus riscos locais são altos e não desprezíveis.
The Role of Environmental Evaluation within Circular Economy: An Application of Life Cycle Assessment (LCA) Method in the Detergents Sector.	2019	LUCCHETTI, Maria G. <i>et al.</i> , 2019.	O objetivo desse estudo é analisar as vantagens ambientais de um detergente ecológico que utiliza óleos vegetais regenerados oriundos da indústria alimentícia, o que ajuda a evitar impactos relacionados ao descarte desses materiais e preservando os ecossistemas da excessiva extração. Se trata de uma ACV parcial, chegando à fase de saponificação, e comparando os impactos ambientais decorrentes do processo de produção do Re-Detergente com os de um sabão tradicional. Os impactos avaliados foram: Carcinógenos, orgânicos respiratórios, Inorgânicos respiratórios, Mudanças Climáticas, Radiação, Camada de ozônio, Ecotoxicidade, Acidificação/Eutrofização, Uso da terra, Minerais e Combustíveis fósseis. Os resultados mostram que o processo produtivo analisado causa impactos principalmente em três categorias: uso do solo, combustíveis e efeitos respiratórios inorgânicos. Dentre essas categorias de impactos, a que tem maior relevância é aquela relacionada ao uso da terra: esse alto impacto, na verdade, é causado pelo processo relacionado à produção e uso do óleo de coco. A análise do estudo de caso constatou que o uso de óleos vegetais regenerados para a produção de sabão permite reduzir significativamente os impactos ambientais em relação ao uso de óleo de coco importado de outros países. Foi verificado que o produto contendo matéria-prima de origem secundária tem menor impacto ambiental se comparado a um produto padrão equivalente.
The effect of compact formulations on the environmental profile of Northern European granular laundry detergents Part II: Life Cycle assessment	2002	SAOUTER, Erwan <i>et al.</i> , 2002.	Esse trabalho apresenta uma análise do perfil ambiental dos detergentes para roupa baseado em dados inventariados de ciclo de vida, o estudo abrange as diferentes formulações e mudanças de processo significativas que abrange o período de 1988 até 1998. As categorias de impacto usadas foram: acidificação, toxicidade aquática, eutrofização, gases de efeito estufa, toxicidade humana, substâncias que destroem a camada de ozônio e poluição. O estudo foi feito no recorte Cradle-to-Gate e não revelaram diferenças significativas entre os próprios produtos, conforme fabricados entre 1988, 1992 e 1998. O consumo de matéria-prima e energia, bem como as emissões ambientais (ar, água e resíduos sólidos), diminuíram após a introdução de detergentes compactos (redução de massa) em 1988.

TÍTULO	ANO	REFERÊNCIA	RESULTADOS MAIS RELEVANTES
Environmental Performance of Palm-Based Methyl Ester Sulphonates Production Using Life Cycle Approach	2016	ZOLKARNAIN, Norazah <i>et al.</i> , 2016.	Este estudo foi realizado para identificar os potenciais impactos ambientais que podem estar associados à produção do sulfonato éster metílico de palma (MES), uma alternativa interessante aos surfactantes à base de petróleo. Foi utilizada a metodologia Eco-indicador 99 e o banco de dados Ecoinvent, abrangendo 11 categorias de impacto, sendo elas: cancerígenos, orgânicos respiratórios, inorgânicos respiratórios, mudanças climáticas, radiação, camada de ozônio, ecotoxicidade, acidificação, uso da terra, combustíveis minerais e fósseis. Os impactos mais significativos foram combustíveis fósseis, inorgânicos respiratórios e mudanças climáticas, foi identificado com a análise de sensibilidade que usando uma instalação de captura de biogás na fábrica, é possível reduzir em 48 % o impacto de combustíveis fósseis, inorgânicos respiratórios e categorias de impacto da mudança climática. O estudo sugere que o MES à base de palma pode ser a melhor alternativa para substituir o surfactante à base de petróleo.
Gate-to-gate life cycle assessment of biosurfactants and bioplasticizers production via biotechnological exploitation of fats and waste oils	2018	KOPSAHELIS, Alexandros <i>et al.</i> , 2018.	Este estudo investigou o desempenho ecológico e os impactos ambientais da biotransformação de gorduras e resíduos oleosos em biosurfactantes glicolipídicos e bioplastificantes. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto: Potencial de Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Oxidação Fotoquímica, Potencial de Acidificação, Eutrofização e fóssil não renovável. O estudo identificou que as emissões atmosféricas, as necessidades de eletricidade e térmicas, durante a produção foi as questões de maior impacto. A produção de sofrólipídios resultou em impacto ambiental 22,7 % maior em relação à produção de ramnolipídios. Assim como, a produção de Ésteres etílicos de ácidos graxos (FAEE) apresenta impacto ambiental 67 % menor em comparação com a produção de monoglicerídeos (MAG).
A database for the life-cycle assessment of Procter & Gamble laundry detergents	2002	SAOUTER & VAN HOOF, 2002.	O estudo costumizou inventário de ciclo de vida (ICV) e avaliação de ciclo de vida (ACV) de detergente para roupa (P&G) usado na Bélgica. Foram utilizados dados de diferentes bancos de dados para compor a pesquisa, o (ICV) abrange todo o ciclo de vida do produto. As categorias de impactos consideradas foram: Acidificação, Toxicidade aquática, Eutrofização, Efeito estufa, Toxicidade humana, Depleção do ozônio e Fotoquímica. São levantados cenários que consideram o impacto da rede elétrica na Bélgica, Noruega e UCPTe (Rede europeia de sistema de transmissão e operação de eletricidade). É percebido que o impacto do estágio de uso do consumidor é muito sensível à variabilidade dos hábitos de consumo, a etapa de uso do produto é a mais importante; a maioria das emissões e, portanto, a maioria das pontuações de impacto ambiental são determinadas pela forma como o consumidor usa o detergente.

TÍTULO	ANO	REFERÊNCIA	RESULTADOS MAIS RELEVANTES
A compilation of life cycle studies for six household detergent product categories in Europe: the basis for product-specific AISE Charter Advanced Sustainability Profiles	2015	GOLSTEIJN, Laura <i>et al.</i> , 2015.	O artigo apresenta e discute a ACV das categorias de produtos de detergente domésticos conduzidos para a Carta para Limpeza Sustentável pela A.I.S.E., são eles: detergentes para lavagem manual da louça, detergentes em pó e em tablete, limpadores em spray para vidros de janelas, limpadores em spray para banheiro, limpadores de banheiro com ácido e limpadores com água sanitária. A categoria dos produtos analisados foi no recorte berço-portão, e quantificou as seguintes categorias de impacto: Alterações Climáticas, Formação de material particulado, Ocupação de terras agrícolas, Ocupação do solo urbano, Transformação natural da terra, Depleção de metal e Depleção de fósseis. A compilação de estudos de ciclo de vida neste artigo mostra os impactos ambientais de seis tipos de detergentes, com exclusão dos impactos humanos e de ecotoxicidade. Os resultados não são apresentados para comparação entre os produtos - afinal, seus usos pretendidos são diferentes na maioria dos casos -. Com resultados para detergentes lava-louças e para a roupa, os principais impactos foram a temperatura da água, o consumo de água (para detergentes para lava-louças), a dosagem do produto (para detergentes para roupa), e a escolha e quantidade de surfactante.
Life-cycle-assessment/ inventory for detergent manufacturing	1995	FRANKE, M. <i>et al.</i> , 1995.	Não foi possível acessar
Uncertainties in a carbon footprint model for detergents; quantifying the confidence in a comparative result	2009	DE KONING, Arjan <i>et al.</i> , 2009.	O artigo apresenta um estudo que examina a incerteza nas Pegadas de Carbono estimados de um detergente líquido e um detergente em pó compacto e como a incerteza varia com o tipo de comparação que se deseja fazer. Foi utilizado um modelo simplificado de CF para detergentes, abrangendo todas as fases do ciclo de vida e comparados em três casos diferentes e a incerteza nos CFs foi calculada para cada uma das três situações de comparação usando uma abordagem de análise de sensibilidade/incerteza gradual. É percebido que a abordagem passo-a-passo (stepwise) torna possível obter estimativas de incerteza confiáveis sem a necessidade de ter descrições de incerteza muito boas para cada parâmetro de entrada. Os cálculos de CF para produtos só podem fornecer uma comparação justa se o sistema de segundo plano da ACV usado para os dois produtos for o mesmo e forem feitas exatamente as mesmas escolhas no sistema de primeiro plano. Na prática, isso exigiria consulta e acordo sobre regras de categorias específicas de produtos. As incertezas são ampliadas quando há comparação com dados de terceiros, onde não há informações específicas sobre como esses dados foram obtidos.

TÍTULO	ANO	REFERÊNCIA	RESULTADOS MAIS RELEVANTES
Comparison between three different LCIA methods for aquatic ecotoxicity and a product environmental risk assessment	2004	PANT, Rana <i>et al.</i> , 2004.	O estudo de caso do detergente teve como objetivo: 1) comparar três formas de detergente para a roupa da P&G (Pó Regular, Pó Compacto e Líquido Compacto) em relação aos seus impactos potenciais na ecotoxicidade aquática, 2) fornecer insights sobre as diferenças entre os vários Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA) em relação às necessidades de dados e resultados e 3) comparação dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) com os resultados de uma Avaliação de Risco Ambiental (ERA). As categorias de impacto analisadas foram: Ecotoxicidade da água doce, Ecotoxicidade da água do mar, Ecotoxicidade aquática e Ecotoxicidade aquática crônica. Foram usados diferentes métodos: EDIP97 (ecotoxicidade aquática crônica), USES-LCA (ecotoxicidade da água doce e do mar) e IMPACT 2002 (ecotoxicidade aquática). As diferentes abordagens de cálculos dos métodos dificulta o consenso. As diferentes respostas à pergunta sobre qual tipo de detergente é preferido em relação à categoria de impacto ecotoxicidade aquática não é satisfatória, a menos que razões explícitas para as diferenças sejam identificáveis, dificultando a decisão prática em tomadas de decisão.
New and updated life cycle inventories for surfactants used in European detergents: summary of the ERASM surfactant life cycle and ecofootprinting project	2018	SCHOWANEK, Di-ederik <i>et al.</i> , 2018.	O objetivo deste trabalho foi descrever como o conjunto de dados que compõe ICV do berço ao portão para uma série de surfactantes comuns usados em detergentes e produtos de higiene pessoal europeus foram compilados voluntariamente por 14 grandes empresas que colaboram com a ERASM, para fornecer alguns resultados resumidos e interpretação, e para indicar onde os conjuntos de dados completos e documentação técnica adicional podem ser encontrados. Esses dados são direcionados como uma média de mercado representativa e acordada pela indústria para surfactantes na Europa para o ano de referência 2011. Foi obtido 70 coletas de dados primários em 12 empresas distintas. Para ilustrar o resultado do trabalho, duas categorias de impacto foram calculadas e relatadas, ou seja, demanda de energia primária (fóssil, nuclear e renovável) e potencial de aquecimento global. Os ICVs permitem o cálculo de categorias de impacto adicionais, mas estas não foram analisadas. O estudo ERASM SLE 2014 fornece conjuntos de dados agregados e atualizados de ICV para o ano de referência de 2011 para 4 grupos principais de surfactantes, 15 substâncias no total, mais 17 precursores, recomenda-se ainda não comparar diretamente o perfil ambiental dos surfactantes com base na massa, cada tipo de surfactante vem com sua própria "pegada" de requisitos de recursos e emissões, por isso é sugerível a comparação de resultados médios (com dados específicos da empresa) como parte de um sistema completo de produtos do berço ao túmulo.

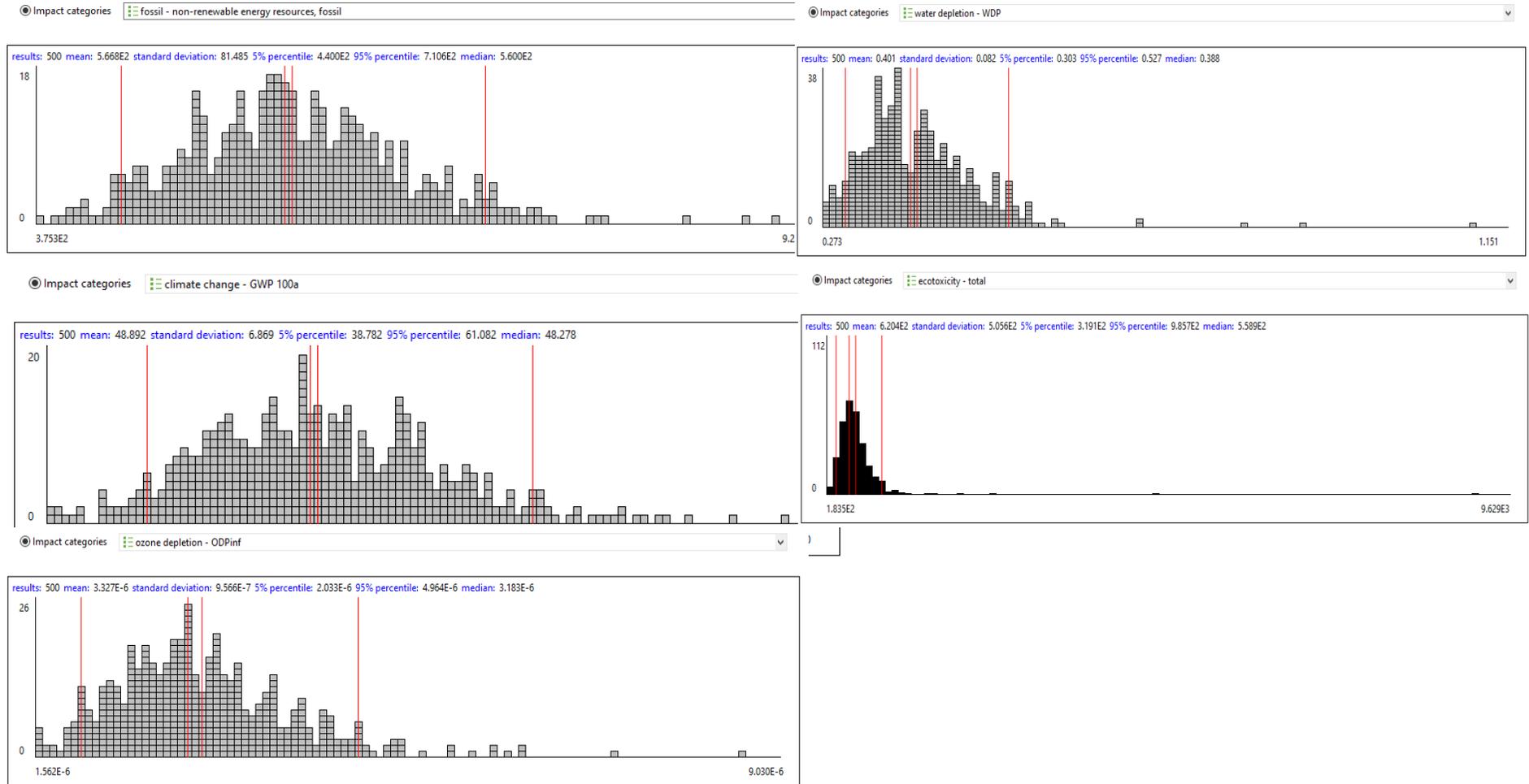
C6				1kg de Produto		IPCC		CED		RECIFE			USETOX		
Fluxo	Qt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Sulfato de amônio	1,076	kg	market for ammonium sulfate ammonium sulfate Cutoff, U - RoW	1,36E+00	1%	1,60E+01	1%	6,09E-08	0%	9,09E-03	0%	8,89E+01	4%	3,98E-06	6%
Glucose	8,907	kg	market for glucose glucose Cutoff, U - GLO	1,14E+01	4%	1,38E+02	4%	7,88E-07	5%	1,13E-01	5%	1,56E+02	7%	-7,83E-06	-11%
Fruose	8,907	kg	sugarcane processing, traditional annexed plant sugar, from sugarcane Cutoff, U - BR	1,89E+00	1%	3,87E+01	1%	2,73E-07	2%	1,58E-01	7%	2,69E+01	1%	4,89E-06	7%
Fosfato monopotássico	3,229	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	2,79E+00	1%	3,92E+01	1%	2,66E-07	2%	2,36E-02	1%	4,83E+01	2%	1,61E-06	2%
Molibdato de sódio dihidratado	6,459	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,14E+01	4%	1,24E+02	4%	1,23E-06	9%	7,11E-02	3%	1,47E+02	7%	6,55E-06	9%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,646	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	6,61E-01	0%	8,79E+00	0%	8,21E-08	1%	1,42E-03	0%	1,07E+01	0%	5,67E-07	1%
Água	#####	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	4,52E-01	0%	5,39E+00	0%	1,04E-07	1%	1,16E+00	51%	1,11E+01	1%	4,14E-07	1%
Ácido clorídrico	0,011	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	9,22E-03	0%	1,15E-01	0%	3,71E-09	0%	3,56E-05	0%	1,51E-01	0%	5,74E-09	0%
Hidróxido de sódio	0,001	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,22E-03	0%	1,42E-02	0%	7,69E-10	0%	4,74E-06	0%	9,59E-03	0%	4,87E-10	0%
Ar	807,320	m³	market for compressed air, 600 kPa gauge compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U - RoW	9,25E+01	35%	1,07E+03	34%	2,30E-06	16%	3,61E-01	16%	9,97E+02	46%	2,99E-05	43%
Eletricidade	632,939	kWh	market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR	1,36E+02	51%	1,57E+03	50%	8,73E-06	61%	3,85E-01	17%	6,92E+02	32%	2,93E-05	42%
Vapor	21,529	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	7,14E+00	3%	9,71E+01	3%	5,23E-07	4%	1,27E-02	1%	8,12E+00	0%	9,50E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	1,000	kg		2,66E+02		3,10E+03		1,44E-05		2,30E+00		2,19E+03		7,03E-05	
wastewater	995,694	kg													
C7															
1kg de Produto				IPCC		CED		RECIFE			USETOX				
Fluxo	Qt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	1,429	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	3,41E+00	4%	3,04E+01	3%	1,13E-07	3%	4,48E-03	1%	1,10E+01	2%	4,25E-07	2%
Glicerol (Resíduo)	14,286	kg	fi	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Fosfato monopotássico	0,714	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	6,18E-01	1%	8,66E+00	1%	5,89E-08	1%	5,21E-03	1%	1,07E+01	2%	3,56E-07	2%
Molibdato de sódio dihidratado	1,786	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	3,16E+00	4%	3,43E+01	3%	3,39E-07	8%	1,96E-02	3%	4,06E+01	6%	1,81E-06	8%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,071	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	7,31E-02	0%	9,72E-01	0%	9,08E-09	0%	1,57E-04	0%	1,18E+00	0%	6,28E-08	0%
Água	338,857	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	1,46E-01	0%	1,74E+00	0%	3,37E-08	1%	3,77E-01	57%	3,60E+00	1%	1,34E-07	1%
Ácido clorídrico	0,004	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	3,05E-03	0%	3,83E-02	0%	1,23E-09	0%	1,18E-05	0%	5,01E-02	0%	1,90E-09	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	4,06E-03	0%	4,71E-03	0%	2,55E-10	0%	1,57E-06	0%	3,18E-03	0%	1,62E-10	0%
Ar	267,857	m³	market for compressed air, 600 kPa gauge compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U - RoW	3,07E+01	36%	3,55E+02	36%	7,62E-07	17%	1,20E-01	18%	3,31E+02	52%	9,92E-06	44%
Eletricidade	210,000	kWh	market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR	4,52E+01	53%	5,20E+02	53%	2,90E-06	66%	1,28E-01	19%	2,30E+02	36%	9,73E-06	43%
Vapor	7,143	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	2,37E+00	3%	3,22E+01	3%	1,74E-07	4%	4,22E-03	1%	2,69E+00	0%	3,15E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	1,000	kg		8,57E+01		9,83E+02		4,39E-06		6,58E-01		6,30E+02		2,28E-05	
wastewater	330,357	kg													
SENS 1 (C1 substituindo Glicose por Sacarose -sugarcane)															
1kg de Produto				IPCC		CED		RECIFE			USETOX				
Fluxo	Qt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	0,620	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	1,48E+00	4%	1,32E+01	3%	4,89E-08	2%	1,95E-03	0%	4,76E+00	2%	1,84E-07	1%
Açúcar de caldo de cana	6,202	kg	sugarcane processing, traditional annexed plant sugar, from sugarcane Cutoff, U - BR	1,32E+00	3%	2,69E+01	6%	1,90E-07	9%	1,10E-01	28%	1,87E+01	6%	3,40E-06	25%
Fosfato monopotássico	0,633	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	5,47E-01	1%	7,68E+00	2%	5,22E-08	2%	4,62E-03	1%	9,47E+00	3%	3,16E-07	2%
Fosfato dissídico	0,660	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,17E+00	3%	1,27E+01	3%	1,25E-07	6%	7,26E-03	2%	1,50E+01	5%	6,69E-07	5%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,031	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	3,13E-02	0%	4,16E-01	0%	3,88E-09	0%	6,71E-05	0%	5,05E-01	0%	2,69E-08	0%
Cloreto de cálcio	0,120	kg	market for calcium chloride calcium chloride Cutoff, U - RoW	8,67E-02	0%	8,50E-01	0%	2,88E-09	0%	2,03E-04	0%	1,49E+00	0%	5,70E-08	0%
Sulfato de ferro (II) heptahidratado	0,086	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,53E-01	0%	1,66E+00	0%	1,64E-08	1%	9,49E-04	0%	1,96E+00	1%	8,74E-08	1%
Na-EDTA	0,000	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	4,08E-04	0%	4,43E-03	0%	4,39E-11	0%	2,54E-06	0%	5,25E-03	0%	2,34E-10	0%
Água	146,806	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	6,33E-02	0%	7,55E-01	0%	1,46E-08	1%	1,63E-01	41%	1,56E+00	1%	5,80E-08	0%
Ácido clorídrico	0,002	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	1,33E-03	0%	1,66E-02	0%	5,35E-10	0%	5,13E-06	0%	2,17E-02	0%	8,26E-10	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,76E-04	0%	2,05E-03	0%	1,11E-10	0%	6,83E-07	0%	1,38E-03	0%	7,02E-11	0%
Ar	116,279	m³	market for compressed air, 600 kPa gauge compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U - RoW	1,33E+01	34%	1,54E+02	34%	3,31E-07	16%	5,19E-02	13%	1,44E+02	48%	4,31E-06	32%
Eletricidade	91,163	kWh	market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR	1,96E+01	51%	2,26E+02	49%	1,26E-06	59%	5,54E-02	14%	9,97E+01	33%	4,22E-06	31%
Vapor	3,101	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	1,03E+00	3%	1,40E+01	3%	7,53E-08	4%	1,83E-03	0%	1,17E+00	0%	1,37E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	1,000	kg		3,88E+01		4,58E+02		2,12E-06		3,98E-01		2,98E+02		1,35E-05	
wastewater	91,163	kg													

Os encargos de transporte referentes ao fornecimento “sugarcane processing, traditional annexed plant | sugar, from sugarcane | Cutoff, U - BR” foram contabilizados a partir do transporte do fornecedor “market for sugar, from sugarcane | sugar, from sugarcane | Cutoff, U - GLO”

SENS 2 (C1 substituindo Eletricidade BR para GLOBAL)				IPCC		CED		RECIPE			USETOX				
Fluxo	Qnt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	0,620	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	1,48E+00	2%	1,32E+01	1%	4,89E-08	2%	1,95E-03	0%	4,76E+00	1%	1,84E-07	1%
Glucose	6,202	kg	market for glucose glucose Cutoff, U - GLO	7,91E+00	9%	9,64E+01	9%	5,48E-07	19%	7,90E-02	14%	1,09E+02	21%	-5,45E-06	-34%
Fosfato monopotássico	0,633	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	5,47E-01	1%	7,68E+00	1%	5,22E-08	3%	4,62E-03	2%	9,47E+00	2%	3,16E-07	2%
Fosfato dissódico	0,660	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,17E+00	0%	1,27E+01	1%	1,25E-07	4%	7,26E-03	1%	1,50E+01	3%	6,69E-07	4%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,031	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	3,13E-02	0%	4,16E-01	0%	3,88E-09	0%	6,71E-05	0%	5,05E-01	0%	2,69E-08	0%
Cloreto de cálcio	0,120	kg	market for calcium chloride calcium chloride Cutoff, U - RoW	8,67E-02	0%	8,50E-01	0%	2,88E-09	0%	2,03E-04	0%	1,49E+00	0%	5,70E-08	0%
Sulfato de ferro (II) heptahidratado	0,086	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,53E-01	0%	1,66E+00	0%	1,64E-08	1%	9,49E-04	0%	1,96E+00	0%	8,74E-08	1%
Na-EDTA	0,000	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	4,08E-04	0%	4,43E-03	0%	4,39E-11	0%	2,54E-06	0%	5,25E-03	0%	2,34E-10	0%
Água	146,806	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	6,33E-02	0%	7,55E-01	0%	1,46E-08	0%	1,63E-01	29%	1,56E+00	0%	5,80E-08	0%
Ácido clorídrico	0,002	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	1,33E-03	0%	1,66E-02	0%	5,35E-10	0%	5,13E-06	0%	2,17E-02	0%	8,26E-10	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,76E-04	0%	2,05E-03	0%	1,11E-10	0%	6,83E-07	0%	1,38E-03	0%	7,02E-11	0%
Ar	116,279	m³	market for compressed air, 600 kPa gauge compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U - RoW	1,33E-01	15%	1,54E+02	15%	3,31E-07	11%	5,19E-02	9%	1,44E+02	28%	4,31E-06	27%
Eletricidade (GLO)	91,163	kWh	market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - GLO	6,28E+01	71%	7,36E+02	71%	1,72E-06	59%	2,55E-01	45%	2,23E+02	44%	1,55E-05	98%
Vapor	3,101	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	1,03E+00	1%	1,40E+01	1%	7,53E-08	3%	1,83E-03	0%	1,17E+00	0%	1,37E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	1,000	kg		8,84E+01		1,04E+03		2,94E-06		5,66E-01		5,11E+02		1,59E-05	
wastewater	91,163	kg													
SENS 3 (C1 substituindo matriz energética nas utilidades)				IPCC		CED		RECIPE			USETOX				
Fluxo	Qnt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	0,620	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	1,48E+00	7%	1,32E+01	5%	4,89E-08	3%	1,95E-03	1%	4,76E+00	1%	1,84E-07	4%
Glucose	6,202	kg	market for glucose glucose Cutoff, U - GLO	7,91E+00	38%	9,64E+01	39%	5,48E-07	31%	7,90E-02	26%	1,09E+02	22%	-5,45E-06	-127%
Fosfato monopotássico	0,633	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	5,47E-01	3%	7,68E+00	3%	5,22E-08	3%	4,62E-03	2%	9,47E+00	2%	3,16E-07	7%
Fosfato dissódico	0,660	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,17E+00	0%	1,27E+01	0%	1,25E-07	7%	7,26E-03	2%	1,50E+01	3%	6,69E-07	16%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,031	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	3,13E-02	0%	4,16E-01	0%	3,88E-09	0%	6,71E-05	0%	5,05E-01	0%	2,69E-08	1%
Cloreto de cálcio	0,120	kg	market for calcium chloride calcium chloride Cutoff, U - RoW	8,67E-02	0%	8,50E-01	0%	2,88E-09	0%	2,03E-04	0%	1,49E+00	0%	5,70E-08	1%
Sulfato de ferro (II) heptahidratado	0,086	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,53E-01	1%	1,66E+00	1%	1,64E-08	1%	9,49E-04	0%	1,96E+00	0%	8,74E-08	2%
Na-EDTA	0,000	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	4,08E-04	0%	4,43E-03	0%	4,39E-11	0%	2,54E-06	0%	5,25E-03	0%	2,34E-10	0%
Água	146,806	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	6,33E-02	0%	7,55E-01	0%	1,46E-08	1%	1,63E-01	55%	1,56E+00	0%	5,80E-08	1%
Ácido clorídrico	0,002	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	1,33E-03	0%	1,66E-02	0%	5,35E-10	0%	5,13E-06	0%	2,17E-02	0%	8,26E-10	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,76E-04	0%	2,05E-03	0%	1,11E-10	0%	6,83E-07	0%	1,38E-03	0%	7,02E-11	0%
Ar	116,279	m³	compressed air production, 600 kPa gauge, >30kW, optimized generation compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U (edit) - RoW	1,43E+00	7%	1,68E+01	7%	1,44E-07	8%	6,85E-03	2%	7,29E+01	15%	1,93E-06	45%
Eletricidade	91,163	kWh	electricity production, photovoltaic, 570KWp open ground installation, multi-Si electricity, low voltage Cutoff, U - RoW	7,00E+00	34%	8,31E+01	34%	7,58E-07	42%	3,32E-02	11%	2,74E+02	56%	6,28E-06	146%
Vapor	3,101	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U (edit) - RoW	9,69E-01	5%	1,33E+01	5%	7,45E-08	4%	1,60E-03	1%	1,17E+00	0%	1,27E-07	3%
OUTPUT															
Surfactina	1,000	kg		2,08E+01		2,47E+02		1,79E-06		2,99E-01		4,91E+02		4,29E-06	
wastewater	91,163	kg													
SENS 4 (C7 com a produtividade do C1)				IPCC		CED		RECIPE			USETOX				
Fluxo	Qnt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	0,620	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	1,48E+00	4%	1,32E+01	3%	4,89E-08	3%	1,95E-03	1%	4,75E+00	2%	1,84E-07	2%
Glicerol (Resíduo)	6,202	kg	ñ	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Fosfato monopotássico	0,310	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	2,68E-01	1%	3,76E+00	1%	2,56E-08	1%	2,26E-03	1%	4,64E+00	2%	1,55E-07	2%
Molibdato de sódio dihidratado	0,775	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,37E+00	4%	1,49E+01	3%	1,47E-07	8%	8,53E-03	3%	1,76E+01	6%	7,86E-07	8%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,031	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	3,17E-02	0%	4,22E-01	0%	3,94E-09	0%	6,81E-05	0%	5,13E-01	0%	2,72E-08	0%
Água	147,101	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	6,34E-02	0%	7,57E-01	0%	1,46E-08	1%	1,64E-01	57%	1,56E+00	1%	5,82E-08	1%
Ácido clorídrico	0,002	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	1,33E-03	0%	1,66E-02	0%	5,35E-10	0%	5,13E-06	0%	2,17E-02	0%	8,26E-10	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,76E-04	0%	2,05E-03	0%	1,11E-10	0%	6,83E-07	0%	1,38E-03	0%	7,02E-11	0%
Ar	116,279	m³	market for compressed air, 600 kPa gauge compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U - RoW	1,33E+01	36%	1,54E+02	36%	3,31E-07	17%	5,19E-02	18%	1,44E+02	52%	4,31E-06	44%
Eletricidade	91,163	kWh	market group for electricity, medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - BR	1,99E+01	53%	2,26E+02	53%	1,26E-06	66%	5,54E-02	19%	9,97E+01	36%	4,22E-06	43%
Vapor	3,101	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW	1,03E+00	3%	1,40E+01	3%	7,53E-08	4%	1,83E-03	1%	1,17E+00	0%	1,37E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	2,304	kg		3,72E+01		4,27E+02		1,90E-06		2,86E-01		2,74E+02		9,88E-06	
wastewater	330,357	kg													
SENS 5 (SENS 4 + subs. por utilidades renováveis)				IPCC		CED		RECIPE			USETOX				
Fluxo	Qnt.	Unid	Fornecedor	GWP100 (kg CO2eq)	%	Non Renewable (MJ)	%	Ozone depletion (kg CFC11eq)	%	Water consumption (m³)	%	Ecotoxicidade - Total	%	Human toxicity - Total	%
INPUT															
Nitrato de amônio	0,620	kg	market for ammonium nitrate ammonium nitrate Cutoff, U - RoW	1,48E+00	12%	1,32E+01	9%	4,89E-08	4%	1,95E-03	1%	4,75E+00	1%	1,84E-07	2%
Glicerol (Resíduo)	6,202	kg	ñ	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Fosfato monopotássico	0,310	kg	market for inorganic potassium fertiliser, as K2O inorganic potassium fertiliser, as K2O Cutoff, U - BR	2,68E-01	2%	3,76E+00	3%	2,56E-08	2%	2,26E-03	1%	4,64E+00	1%	1,55E-07	2%
Molibdato de sódio dihidratado	0,775	kg	market for chemical, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO	1,37E+00	11%	1,49E+01	10%	1,47E-07	12%	8,53E-03	4%	1,76E+01	5%	7,86E-07	8%
Sulfato de magnésio heptahidratado	0,031	kg	market for magnesium sulfate magnesium sulfate Cutoff, U - GLO	3,17E-02	0%	4,22E-01	0%	3,94E-09	0%	6,81E-05	0%	5,13E-01	0%	2,72E-08	0%
Água	147,101	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW	6,34E-02	1%	7,57E-01	1%	1,46E-08	1%	1,64E-01	75%	1,56E+00	0%	5,82E-08	1%
Ácido clorídrico	0,002	kg	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW	1,33E-03	0%	1,66E-02	0%	5,35E-10	0%	5,13E-06	0%	2,17E-02	0%	8,26E-10	0%
Hidróxido de sódio	0,000	kg	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO	1,76E-04	0%	2,05E-03	0%	1,11E-10	0%	6,83E-07	0%	1,38E-03	0%	7,02E-11	0%
Ar (renovável)	116,279	m³	compressed air production, 600 kPa gauge, >30kW, optimized generation compressed air, 600 kPa gauge Cutoff, U (edit) - RoW	1,43E+00	11%	1,68E+01	12%	1,44E-07	12%	6,85E-03	3%	7,29E+01	19%	1,93E-06	20%
Eletricidade (renovável)	91,163	kWh	electricity production, photovoltaic, 570KWp open ground installation, multi-Si electricity, low voltage Cutoff, U - RoW	7,00E+00	55%	8,31E+01	57%	7,58E-07	62%	3,32E-02	15%	2,74E+02	73%	6,28E-06	66%
Vapor (renovável)	3,101	kg	steam production, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U (edit) - RoW	9,69E-01	8%	1,33E+01	9%	7,45E-08	6%	1,60E-03	1%	1,17E+00	0%	1,27E-07	1%
OUTPUT															
Surfactina	2,304	kg		1,26E+01		1,46E+02		1,22E-06		2,18E-01		3,77E+02		9,55E-06	
wastewater	33														

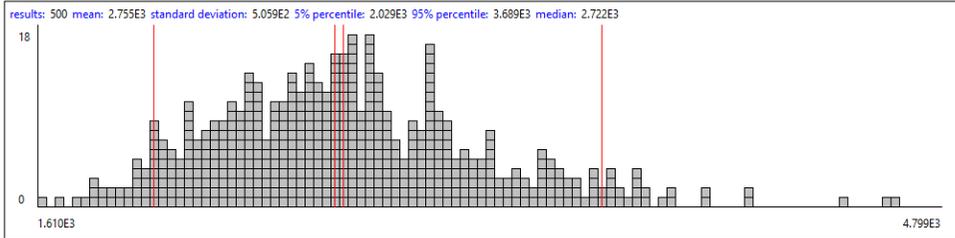
APENDICE C - Simulações de Monte Carlo

CENÁRIO 1

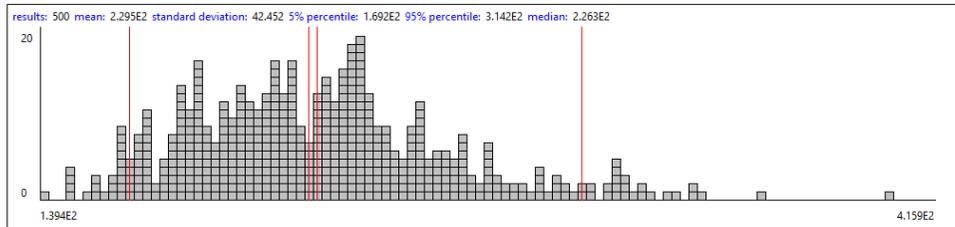


CENÁRIO 2

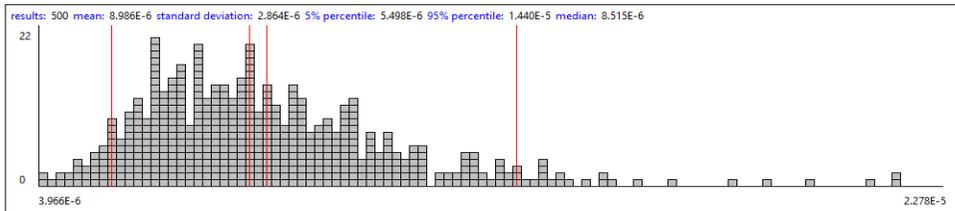
Impact categories fossil - non-renewable energy resources, fossil



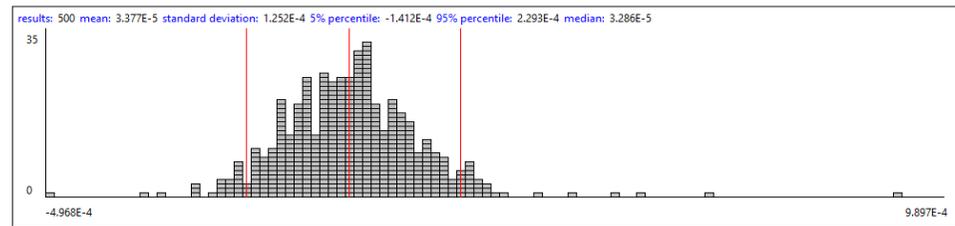
Impact categories climate change - GWP 100a



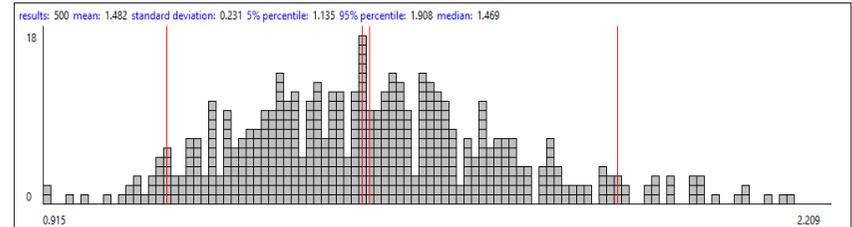
Impact categories ozone depletion - ODPinf



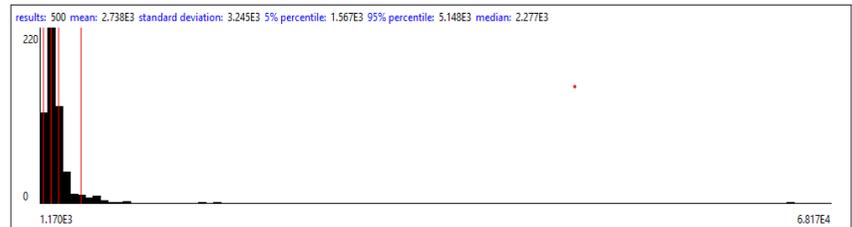
Impact categories human toxicity - total



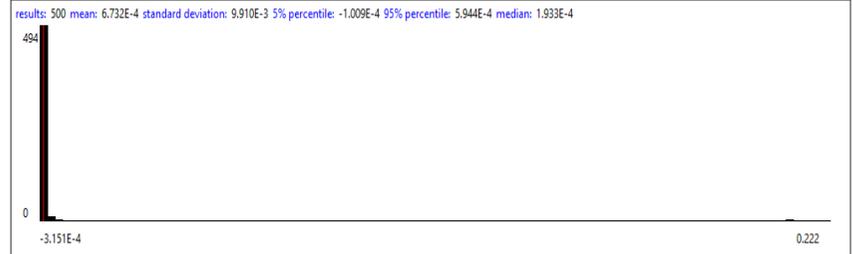
Impact categories water depletion - WDP



Impact categories ecotoxicity - total

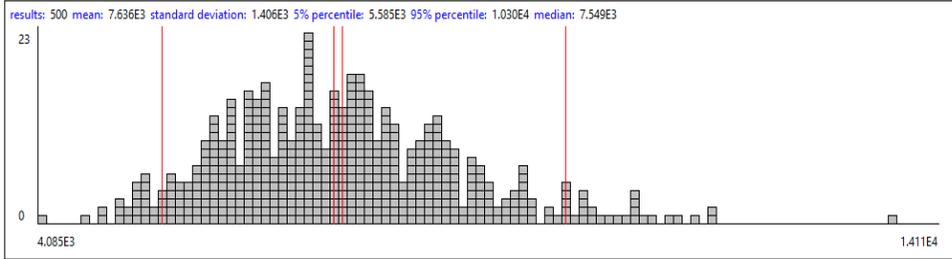


Impact categories human toxicity - total

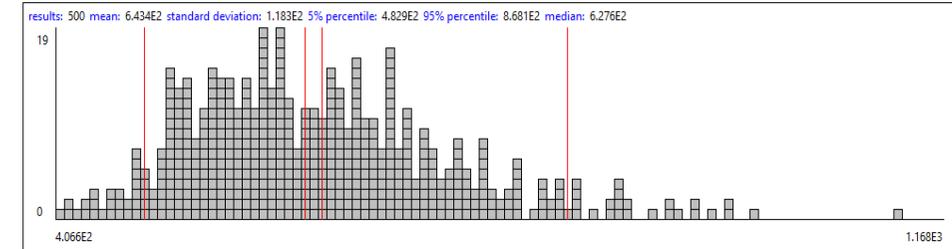


CENÁRIO 3

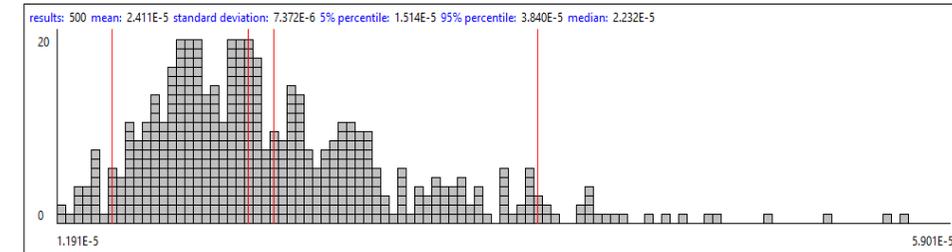
Impact categories: fossil - non-renewable energy resources, fossil



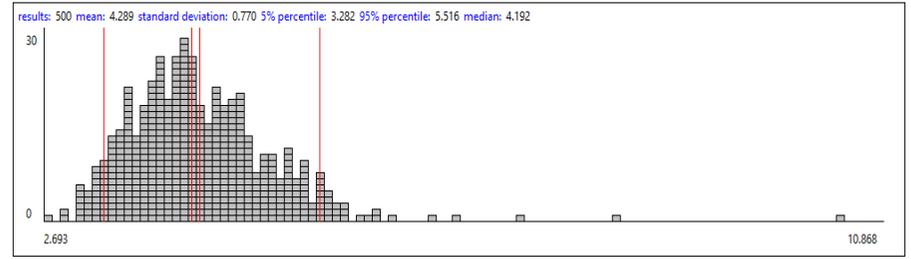
Impact categories: climate change - GWP 100a



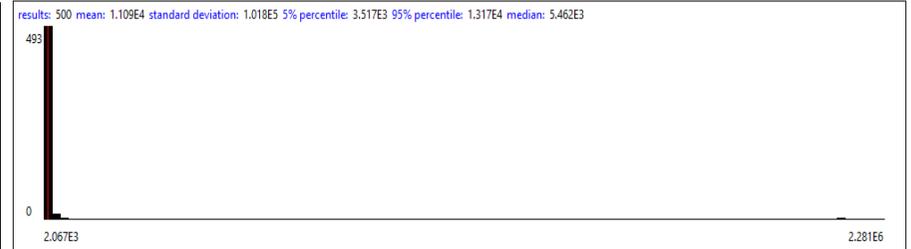
Impact categories: ozone depletion - ODPinf



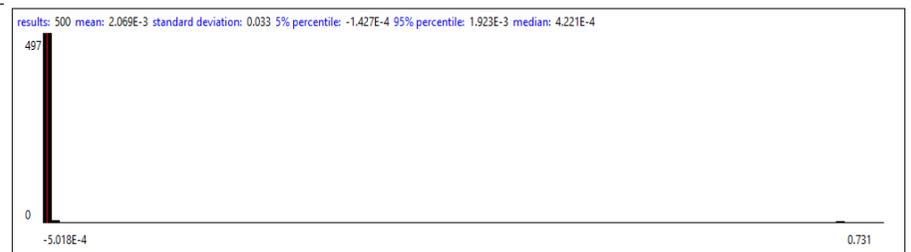
Impact categories: water depletion - WDP



Impact categories: ecotoxicity - total

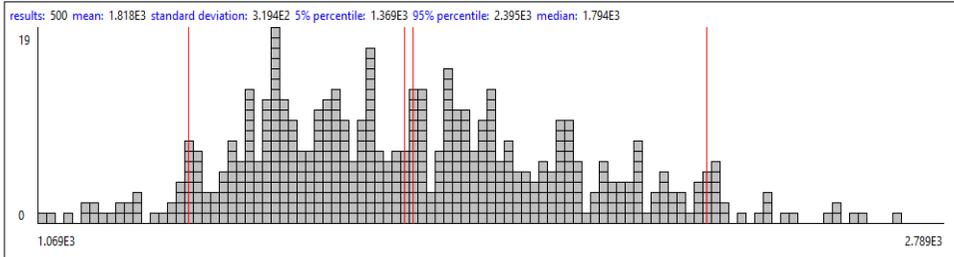


Impact categories: human toxicity - total

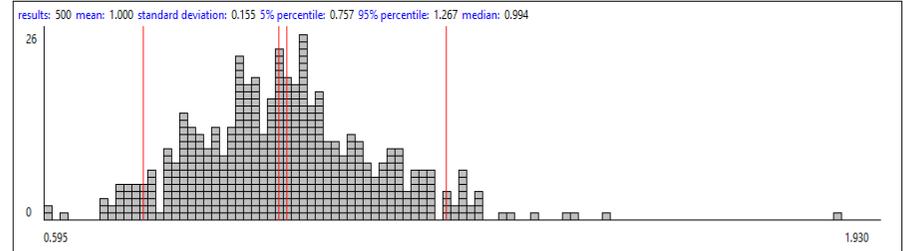


CENÁRIO 4

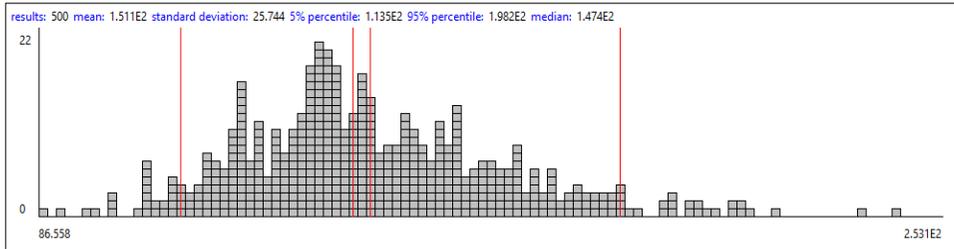
Impact categories: fossil - non-renewable energy resources, fossil



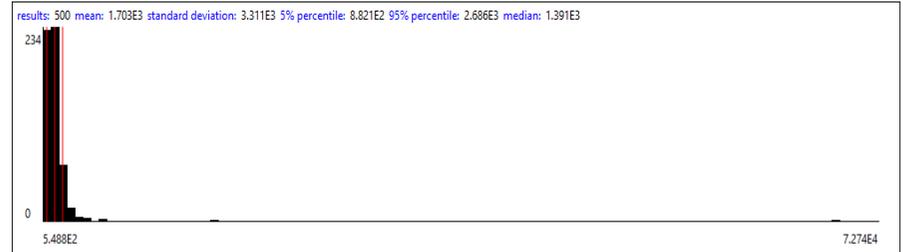
Impact categories: water depletion - WDP



Impact categories: climate change - GWP 100a

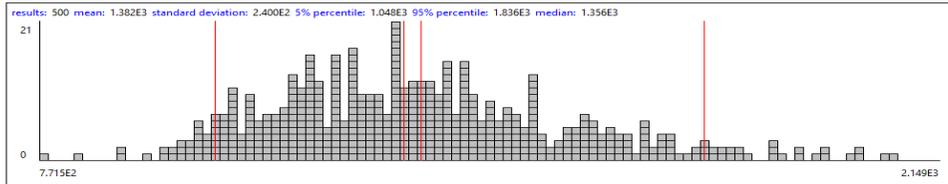


Impact categories: ecotoxicity - total

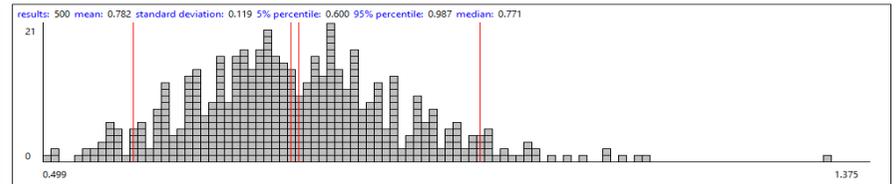


CENÁRIO 5

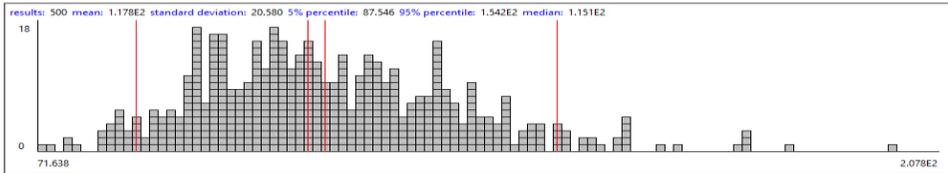
Impact categories fossil - non-renewable energy resources, fossil



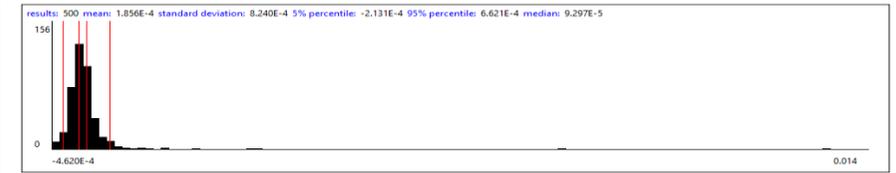
Impact categories water depletion - WDP



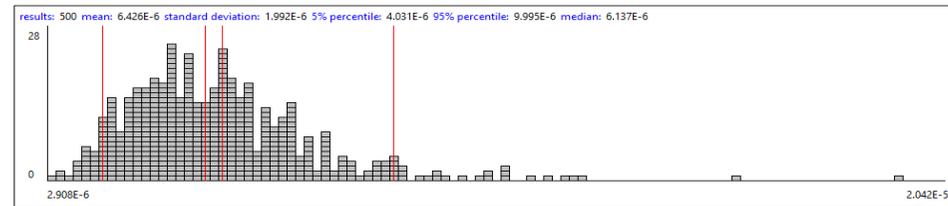
Impact categories climate change - GWP 100a



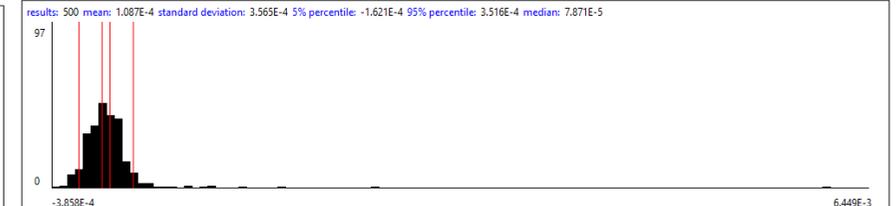
Impact categories human toxicity - total



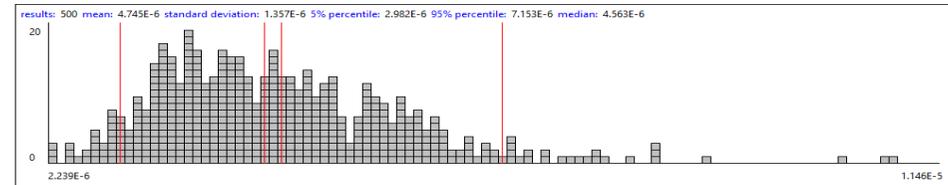
Impact categories ozone depletion - ODPinf



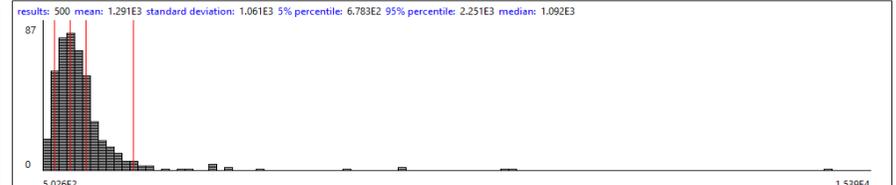
Impact categories human toxicity - total



Impact categories ozone depletion - ODPinf

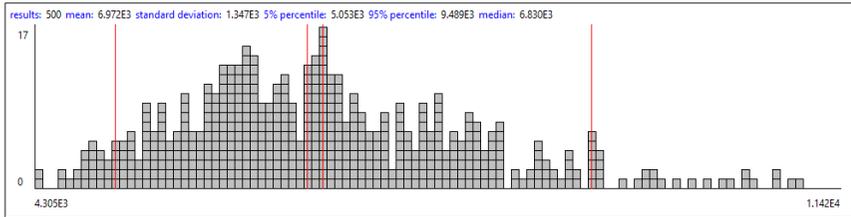


Impact categories ecotoxicity - total

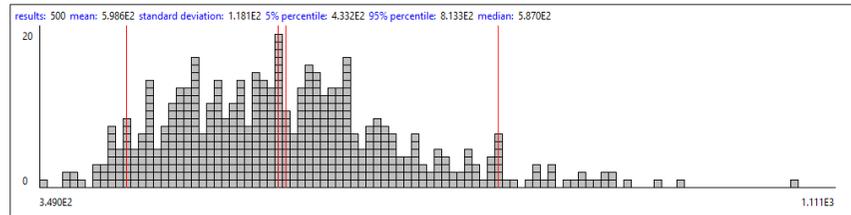


CENÁRIO 6

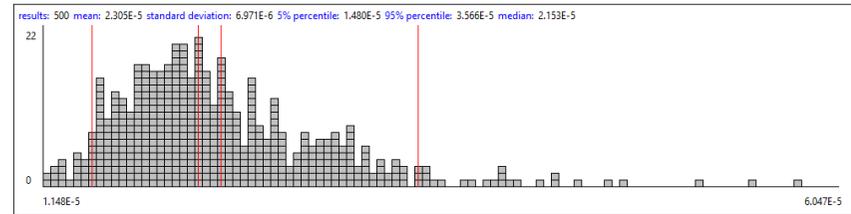
Impact categories: fossil - non-renewable energy resources, fossil



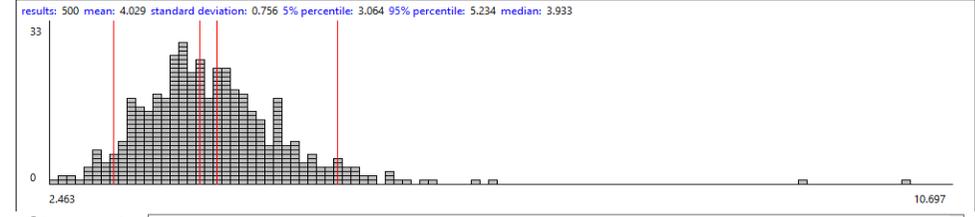
Impact categories: climate change - GWP 100a



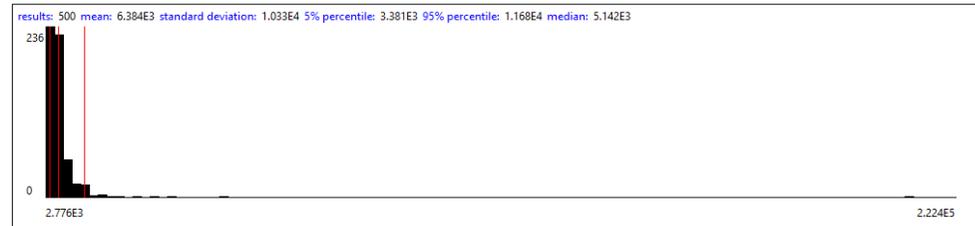
Impact categories: ozone depletion - ODPinf



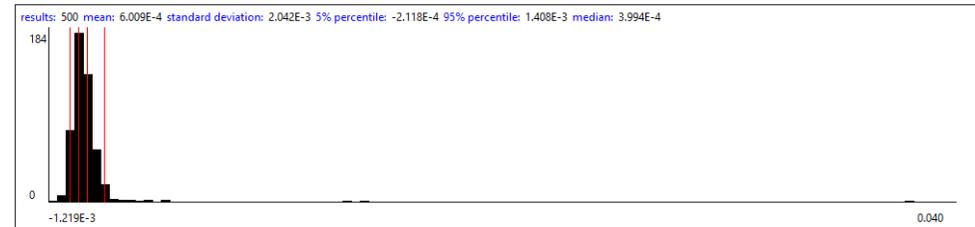
Impact categories: water depletion - WDP



Impact categories: ecotoxicity - total

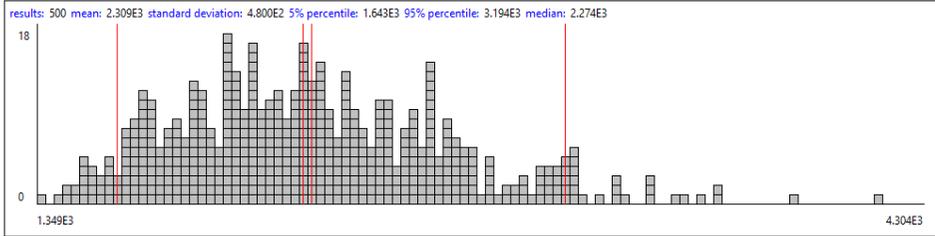


Impact categories: human toxicity - total

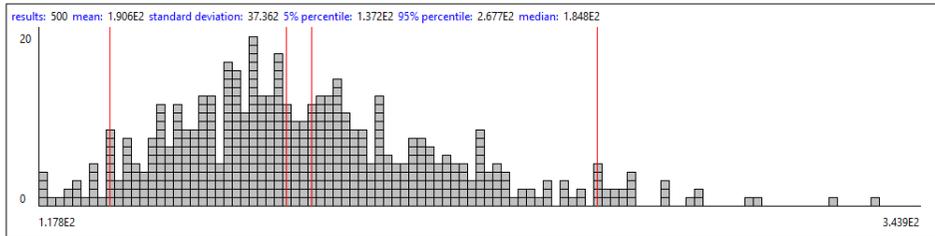


CENÁRIO 7

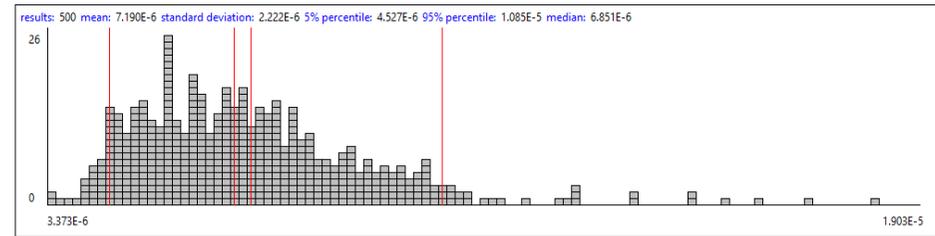
Impact categories: Non renewable, fossil



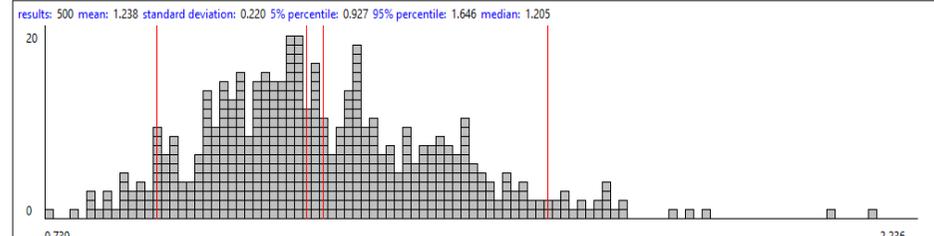
Impact categories: climate change - GWP 100a



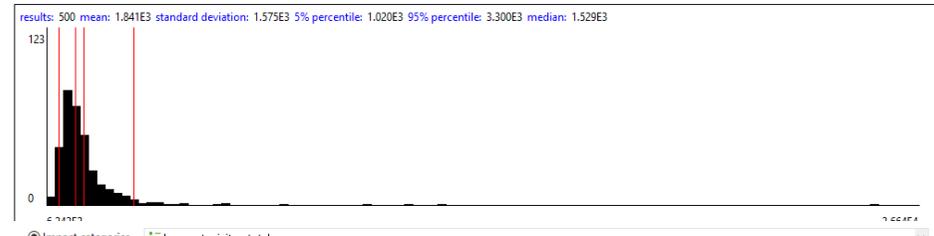
Impact categories: ozone depletion - ODPinf



Impact categories: water depletion - WDP



Impact categories: ecotoxicity - total



Impact categories: human toxicity - total

