

Avaliação do ciclo de vida da produção de ésteres etílicos utilizando mix algal com predominância da alga *Chlorella sp.* em escala laboratorial

*Evaluation of the life cycle of the ethyl esters production using algal mix with predominance of the alga *Chlorella sp.* in laboratory scale*

*Evaluación del ciclo de vida de la producción de ésteres etílicos utilizando mezcla algal con predominancia de la alga *Chlorella sp.* a escala de laboratório*

Amélia Macedo Ramalho

Mestre em Bioenergia e Biocombustíveis, UFPR, Brasil.
melramalho@gmail.com

Marcelo Real Prado

Professoro Doutor, UFTFPR Brasil.
mrealprado@gmail.com

RESUMO

O cultivo de microalgas para a produção sustentável de biocombustíveis tem recebido especial atenção nos últimos anos. Dentre as razões para utilização de microalgas para este fim destacam-se a alta eficiência fotossintética, capacidade de fixação de carbono, habilidade de acumular lipídeos no interior da célula, aliada a uma alta taxa de crescimento capaz de produzir duas a dez vezes mais biomassa comparada à que é produzida por culturas terrestres. Métodos de produção de microalgas baseiam-se em cultivo, separação da biomassa, secagem e obtenção do produto e subprodutos. As vias para a produção de biodiesel algal podem ser variadas e necessitam de uma avaliação quanto aos impactos ambientais que podem estar presentes ao longo do processo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação do ciclo de vida (ACV), comparando os métodos ReCiPe e TRACI, para a produção de microalgas em escala laboratorial, considerando as etapas para obtenção de ésteres etílicos (biodiesel) de um mix de microalgas, com base em um inventário portão a portão e com uma unidade funcional de 1kg de ésteres etílicos. Para tal foi utilizado o software SimaPro 8.4. para execução dos dados de desempenho da sustentabilidade do produto. Foi constatado nos processos realizados e nos métodos comparados que a etapa de extração lipídica obteve destaque ao consumo de água que foi elemento chave impactante ligado ao consumo de energia elétrica, os quais apresentaram alta relevância nas categorias de impactos. A recuperação do solvente mitigou categorias de danos à saúde humana e escassez de minerais.

PALAVRAS-CHAVE: Biocombustíveis, Bioenergia, Avaliação do Ciclo de vida

SUMMARY

The cultivation of microalgae for the sustainable production of biofuels has received special attention in recent years. Among the reasons for the use of microalgae for this purpose are the high photosynthetic efficiency, carbon fixability, ability to accumulate lipids inside the cell, combined with a high growth rate capable of producing two to ten times more compared biomass to that which is produced by terrestrial cultures. Methods of production of microalgae are based on cultivation, separation of biomass, drying and obtaining the product and by-products. The routes for the production of algal biodiesel can be varied and need an evaluation of the environmental impacts that may be present throughout the process. In this context, the objective of this work was to perform a Life Cycle Assessment (LCA), comparing the ReCiPe and TRACI methods, for the production of microalgae in laboratory scale, considering the steps to obtain ethyl esters (biodiesel) from a mix of microalgae, based on a gate-to-gate inventory and with a functional unit of 1 kg ethyl esters. The SimaPro 8.4 software was used for this purpose. performance of the product's sustainability performance data. It was verified in the processes performed and in the comparative methods that the lipid extraction step was highlighted the consumption of water that was a key element impacting the consumption of electric energy, which presented high relevance in the categories of impacts. Solvent recovery mitigated categories of human health damage and mineral shortages.

KEY WORDS: Biofuels, Bioenergy, Life Cycle Assessment

RESUMEN

El cultivo de microalgas para la producción sostenible de biocombustibles ha recibido especial atención en los últimos años. Entre las razones para la utilización de microalgas para este fin se destacan la alta eficiencia fotosintética, capacidad de fijación de carbono, capacidad de acumular lípidos en el interior de la célula, aliada a una alta tasa de crecimiento capaz de producir entre dos y diez veces más biomasa comparada a la que es producida por cultivos terrestres. Los métodos de producción de microalgas se basan en el cultivo, la separación de la biomasa, el secado y la obtención del producto y los subproductos. Las vías para la producción de biodiesel algal pueden ser variadas y necesitan una evaluación de los impactos ambientales que pueden estar presentes a lo largo del proceso. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación del ciclo de vida (ACV), comparando los métodos ReCiPe y TRACI, para la producción de microalgas a escala de laboratorio, considerando las etapas para la obtención de ésteres etílicos (biodiesel) microalgas, sobre la base de un inventario portón a puerta y con una unidad funcional de 1 kg de ésteres etílicos. Para ello se utilizó el software SimaPro 8.4. para la ejecución de los datos de rendimiento de la sostenibilidad del producto. Se constató en los procesos realizados y en los métodos comparados que la etapa de extracción lipídica obtuvo destaque al consumo de agua que fue elemento clave impactante ligado al consumo de energía eléctrica, los cuales presentaron alta relevancia en las categorías de impactos. La recuperación del solvente mitigó las categorías de daños a la salud humana y la escasez de minerales.

PALABRAS CLAVE: Biocombustibles, Bioenergía, Evaluación del Ciclo de vida

1 Introdução

A crescente demanda global de energia e sua dependência energética faz com que o setor de combustíveis fósseis gere preocupações sociais e ambientais, tais como o aquecimento global e deficiência energética (BP, 2017).

Estima-se que a demanda de energia deverá aumentar em 50% ou mais até 2030, devido ao rápido crescimento populacional. Além do mais, o petróleo natural não pode recuperar a taxa de consumo atual, previsto para ser 105 vezes mais rápido do que a natureza pode criar (Shuba; Kifle 2018).

Dentro desse contexto, a busca por energia "limpa" tornou-se um dos maiores desafios para a ciência. Portanto, várias fontes alternativas de energia, incluindo energia solar, hidrelétrica, geotérmica, eólica e **biocombustíveis**, estão sendo estudadas e implementadas (Raheem et al. 2018). Logo, os biocombustíveis são vistos como meios reais de alcançar o objetivo de substituir os combustíveis fósseis a curto prazo (Shuba; Kifle 2018).

Combustíveis de origem biológica, os biocombustíveis podem ser produzidos a partir de amido, óleos vegetais, gorduras animais, biomassa residual ou biomassa de algas, não tóxicas, biodegradáveis e renováveis (Song et al. 2008). Entre as matérias-primas promissoras, as microalgas estão ganhando interesse devido a inúmeras vantagens em relação a biomassa convencional, tal como sua alta taxa de crescimento e concentração lipídica, cultivadas em áreas não agricultáveis, portanto não compete com o setor de alimentos e está associada à maior taxa de absorção de CO₂ por unidade cultivada (Valente et al. 2019).

Para obter o biodiesel de microalgas é necessário proceder quatro sucessivos passos: o cultivo de microalgas, a colheita da biomassa, a extração de lipídios e pôr fim a transesterificação (Zhu et al. 2017). No entanto, há uma série de barreiras técnicas e econômicas a serem superadas para implantação de uma usina de energia a base de microalgas em escala comercial (Chia; Chew 2018).

Contudo, as etapas de secagem, desidratação da biomassa algal, tal como a extração e transesterificação, exigem uma grande quantidade de energia impulsionando altos custos operacionais (Gouveia et al. 2017), e sobretudo, o consumo de energia possui um caráter desfavorável para o meio ambiente gerando impactos e esgotamento de recursos naturais.

Para compreender o desempenho dos sistemas de energia das microalgas, análises abrangentes, indicadores ambientais, econômicos e sociais devem ser realizados seguindo um ciclo de vida. Em relação aos aspectos ambientais, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerada uma ferramenta de tomada de decisões, é uma metodologia bem estabelecida para avaliar de forma abrangente os impactos ambientais de um sistema de produtos com uma abordagem "do berço ao túmulo" (Valente et al. 2019).

O método (ACV), quantifica os impactos ambientais de todas as etapas associadas no ciclo de vida, em que, aborda um produto ou processo dentro de um limite definido de um sistema. Esta abordagem identifica pontos de menor eficiência ambiental (Bennion et al. 2015).

De acordo com ISO 14040, o processo de ACV consiste em quatro fases básicas: Definição do Objetivo e Escopo, Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e Interpretações (ABNT, 2014a).

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira fase da (ACV) e tem como finalidade avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário por meio de modelos e fatores de caracterização contidos nos métodos de AICV. Por não existirem métodos desenvolvidos especificamente para o contexto brasileiro, nem para a América do Sul, recomenda-se métodos que apresentam uma abrangência classificada como global para as categorias

relacionadas ao aquecimento global e métodos suplantados para o escopo de aplicação de suas categorias de impacto (Mendes 2013).

Os métodos ReCiPe e TRACI possuem abrangência global e suplantada, diferenciados pela localização geográfica em que respectivamente abrange a Europa e aos EUA, diante destas condições tais métodos foram optados para avaliar a significância dos impactos neste estudo. Em relação a ACV de biodiesel de microalgas, encontra-se na literatura diversos estudos, Collet et al. (2015), disponibiliza uma revisão abrangente ao tema. Em particular a maioria dos estudos concentram a avaliação dos impactos em relação ao aquecimento global. Destaca-se alguns fatores limitantes nos estudos encontrados na literatura, a variação na escolha da unidade funcional, o dimensionamento espacial, a medição temporal, alocação da geração de coprodutos e a não inclusão de certos impactos ambientais (Bicalho et al. 2012).

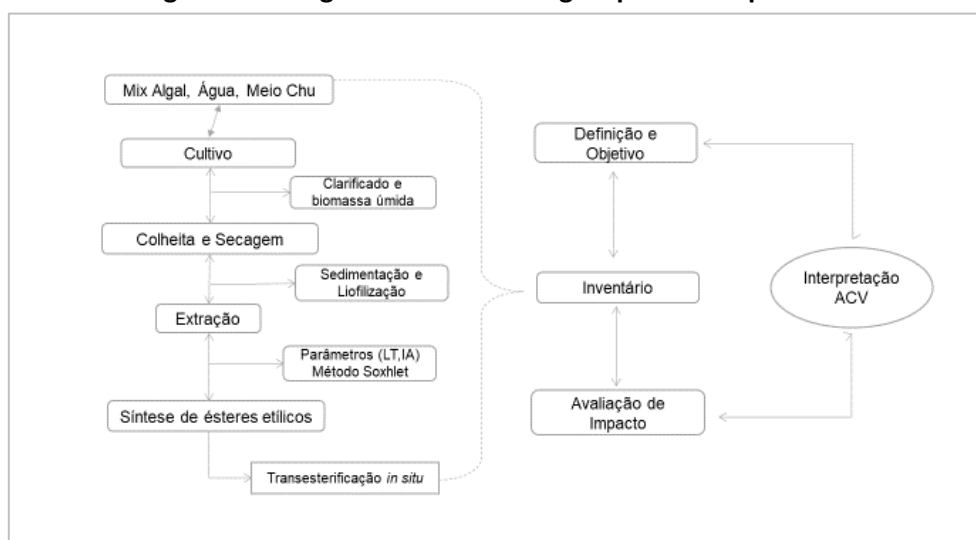
Nesse contexto, o presente estudo, tem por objetivo, realizar a ACV do processo de produção de biodiesel de microalgas em escala laboratorial, abordando as etapas do montante à jusante, considerando a eficiência energética, o desempenho ambiental, os impactos relacionados aos gases de efeito estufa (GEE), ao uso de fertilizantes (acidificação e eutrofização), aos produtos fitossanitários (toxicidade humana e ecotoxicidade), ao uso da terra e ao consumo de água. A importância deste estudo está na identificação, eficácia e valia dos métodos, tal como a identificação dos pontos de menor eficiência no processo dentro das condições em que foram realizados.

2 Metodologia

2.1 Designer experimental da produção de ésteres etílicos de microalgas

Todos os experimentos, desde o cultivo, colheita, secagem, extração lipídica e a transesterificação foram realizados no Laboratório de Pesquisas Relacionadas com Biomassa e Bioenergia (LAPREBB), localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba PR. A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia aplicadas nas 4 etapas para a produção de ésteres etílicos de microalgas e a realização da ACV.

Figura 1: Fluxograma da metodologia aplicada no processo



Fonte: a autora, 2019

2.1.1 Cultivo

Para a realização do cultivo do cultivo do mix algal foi necessário realizar a montagem do sistema, em que consiste em 23 biorreatores (marca Pirex[®]) com capacidade de 4 galões de (15L e 25L) e 15 balões de 6L, totalizando um volume de 250L. Para garantir uma mistura adequada de nutrientes e ar contendo CO₂ no sistema de cultivo em bancada, foi utilizada a injeção de ar através de um compressor de ar (marca Pressure[®]).

O intuito para o cultivo, foi de simular as condições naturais, portanto o não foi realizado em condições estéreis. O meio de cultivo utilizado foi o meio CHU diluído em 10% do inóculo para 90% do meio de cultivo, realizando o acompanhamento da densidade populacional tanto quanto o cultivo em escala semi-piloto em laboratório para obtenção da biomassa.

2.1.2 Colheita e Secagem

Para a recuperação da biomassa foi adotado o método físico de separação por sedimentação, a fim de otimizar gastos energéticos e uso de reagentes químicos. A sedimentação foi realizada utilizando três cones Imhoff de 1L, totalizando 3L de cultivo e intercalando 3 a 5 dias para a colheita da biomassa úmida sedimentada, armazenada em recipientes de plástico de 40mL e refrigeradas para liofilização. A cada 1L de cultivo estima-se uma sedimentação aproximada de 10mL de biomassa úmida e 0,375g de biomassa seca.

2.1.3 Extração Lipídica

Para caracterizar a fração lipídica da biomassa de microalgas, foram definidos os seguintes parâmetros: lipídeos totais (LT) e índice de acidez (IA). O extrato lipídico da biomassa, foi obtido pela rota de extração Soxhlet (Soxhlet, 1879), empregando os solventes etanol (99,8% Impex[®]) e hexano (PA; Isofar[®], ref. 222), de acordo com a metodologia descrita por D'Oca et al. (2011).

2.1.4 Síntese de ésteres etílicos (transesterificação *in situ*)

Foi realizado uma adaptação de alguns autores (Lewis; Nicholis; McMeekin, 2000; Carvalho Junior, 2010 Lemoes, 2011; Silva-Baumgartner, 2011; Branco, 2013; Cavalcanti, 2015) devido ao alto índice de acidez dos lipídios e foi determinado o uso do solvente etanol ao invés do n-hexano devido à sua menor toxicidade.

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

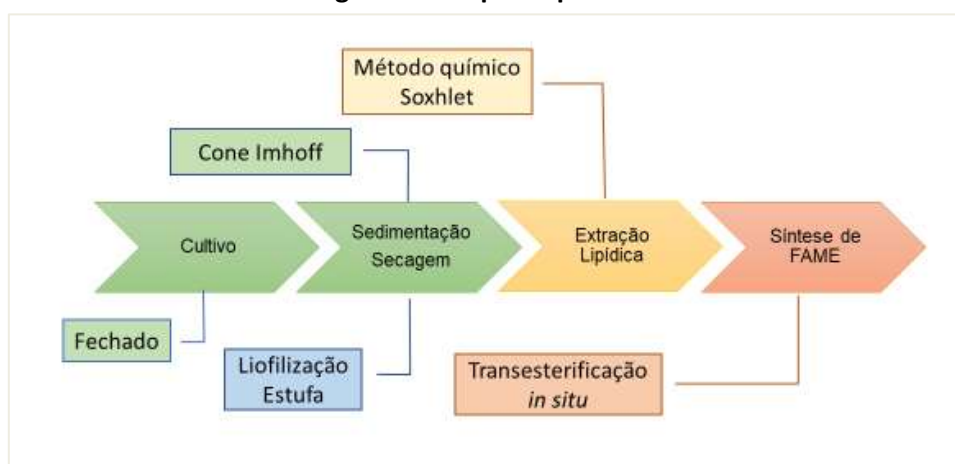
Para a execução da ACV, foi utilizado a metodologia normatizada ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014ab), que se compõem em quatro diferentes fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Foi realizado um balanço de massa em todas as etapas envolvidas no processo para obter ésteres etílicos, desde o montante à jusante. Os dados primários obtidos foram compilados e processados pelo software Simapro versão 8.4. Os dados dos processos produtivos, para a realização da ACV, como a fonte de energia elétrica, tal como os materiais foram disponibilizados e contabilizados no banco de dados ecoinvent e são referentes a matriz energética brasileira.

2.2.1 Escopo

O escopo é definido do montante à jusante do processo composto pelo cultivo, separação e secagem da biomassa, extração e conversão química exibido na Figura 2.

Figura 2: Escopo do processo



Fonte: A AUTORA, 2019

2.2.2 Fronteira do sistema

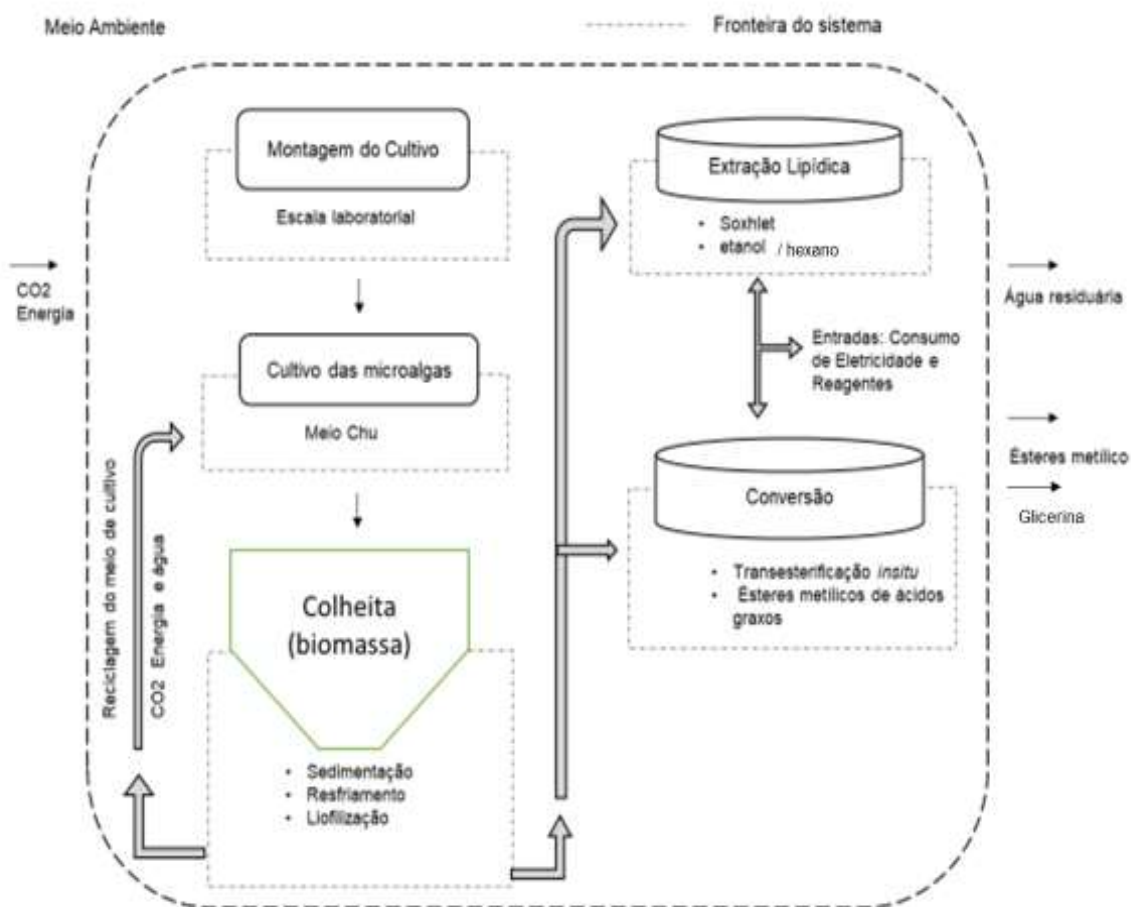
Como variante de demarcação da fronteira, foi estabelecido o processo realizado dentro do portão a portão, esta ACV reflete uma análise parcial, observando apenas uma etapa apresentada de uma cadeia produtiva e um fluxo de referência de 2,5 kg de biomassa, para estabelecer uma unidade funcional de 1L de ésteres etílicos. A fronteira do sistema está representada na Figura 3

Figura 3: Fronteira do sistema

Fonte: A AUTORA, 2019

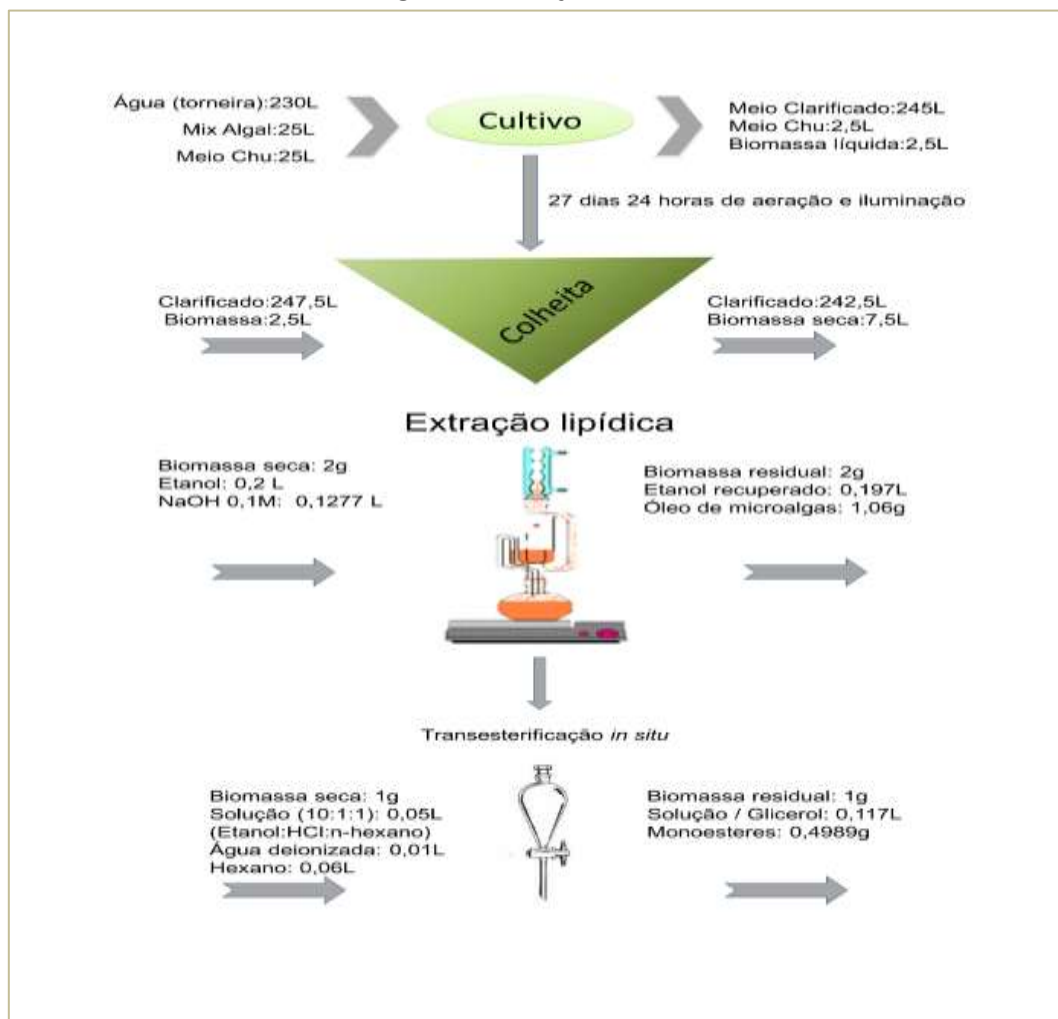
2.2.3 Inventário do ciclo de vida

No inventário, todos os dados das entradas e saídas dos recursos, equipamentos utilizados, fluxo de poluentes e a eficiência energética foram mensurados, desde a montante à jusante. As Figuras 4 e a Tabela 1 exibem o balanço de massa das etapas do processo e os



equipamentos utilizados. A Tabela 2 exhibe o inventário completo do processo no layout do software SimaPro.

Figura 4: Balanço de massa



Fonte: A AUTORA, 2019

Tabela 4: Equipamentos inventariados

EQUIPAMENTOS	POTÊNCIA (W)	PERÍODO (Horas/dia)	TOTAL (kWh)
◆ Cultivo			
Painel fotovoltaico (5 lâmpadas) marca American General AG [®]	5x25	24/27	81
Lâmpadas fluorescentes tubular 24 lâmpadas - marca AG [®]	24x60	10/27	388,8
Compressor ar marca Pressure [®] SE20/200VT	3700	24/27	2397,6
◆ Colheita – Secagem			
Freezer /Cooler H-500 – Electrolux [®]	350	24/520	4368,0
Ultra freezer – marca Indreal [®]	220	24/520	2745,6
Liofilizador (freeze dryer) Marca Liotop [®] L101	650	24/520	8112
Bomba a vácuo Marca Primatec [®]	220	24/520	2745,6
◆ Extração			
Estufa- marca Inova [®] S1	600	24/83	1195,2
Manta aquecedora – Prolab [®]	130	24/83	258,96
Rota evaporador – Fistom [®]	60	24/83	119,52
Banho – Fistom [®]	1200	24/83	2390,4
◆ Transesterificação <i>in situ</i>			
Estufa – Inova [®] S1	600	24/208	2995,2
Banho – Cienlab [®]	100	24/208	499,2

Fonte: A AUTORA, 2019

Tabela 2: Inventário - Modelagem das fases do processo

MODELAGEM PARA A FASE DE CULTIVO DO MIX ALGAL (LAYOUT SimaPro)			
PRODUTOS			
Saídas conhecidas para a esfera tecnológica. Produtos e coprodutos	Quantidade	Unidade	Alocação
Cultivo	0,16667	m3	66,67%
Biomassa	83,33	kg	33,33%
Entradas conhecidas da natureza (recursos)			
Water, unspecified natural origin, BR	0,2	m3	
Sodium nitrate	6,25	kg	
Calcium chloride	0,625	kg	
Fosfato de potássio dibasico (Phosphate ore)	1,875	kg	(continuação)
Fosfato de potássio monobasico (Phosphate ore)	4,375	kg	
Manganese	0,0036	kg	
Molybdenum	0,002975	kg	
Cobalt	0,001225	kg	
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (materias/combustíveis)			
EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid (RoW)	12,5	kg	
Magnesium sulfate (RoW) / production/APOS, S	1,875	kg	
Boric acid, anhydrous, powder (RoW)	2,855	kg	
Zinc monosulfate (RoW)	0,022205	kg	
Copper sulfate (GLO) / production	0,003925	kg	
Potassium hydroxide (RoW)/production/APOS, S	7,75	kg	
Iron (III) chloride, without water, in 14% iron solution state (RoW)	1,245	kg	
Sodium chlorate, powder (RoW)/ production	0,625	kg	
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)			
Electricity, high voltage (BR)/ market for/APOS, S	2867	kWh	
MODELAGEM PARA FASE DA COLHEITA E SECAGEM			
PRODUTOS			
Saídas conhecidas para a esfera	Quantidade	Unidade	Alocação

tecnológica. Produtos e coprodutos

Clarificado	0,16667	m3	97%
Biomassa seca	2,5	kg	3%

Entradas conhecidas da esfera**tecnológica (materiais/ combustíveis)**

Biomassa úmida	83,33	kg	
----------------	-------	----	--

Entradas conhecidas da esfera**tecnológica (eletricidade/calor)**

Electricity, high voltage (BR)/ market for/ APOS, S	17971,2	kWh	
---	---------	-----	--

MODELAGEM PARA FASE DA EXTRAÇÃO LIPÍDICA**Saídas conhecidas para a esfera****tecnológica. Produtos e coprodutos**

	Quantidade	Unidade	(continuação) Alocação
óleo do mix algal	0,053	m3	100%

Saídas conhecidas para a esfera**tecnológica. Produtos evitados**

Ethanol, without water, in 99,7% solution state, from fermentation (BR)	247	kg	
---	-----	----	--

Entradas conhecidas da esfera**tecnológica (materiais/ combustíveis)**

Biomassa seca	2,5	kg	
Ethanol, without water, in 99,7% solution state, from fermentation (BR)	250	kg	
Tap water (RoW) market for APOS, S	960000	kg	

Entradas conhecidas da esfera**tecnológica (eletricidade/calor)**

Electricity, high voltage (BR)/ market for/ APOS, S	3968,08	kWh	
---	---------	-----	--

MODELAGEM PARA A FASE DA TRANSESTERIFICAÇÃO *IN SITU***PRODUTOS****Saídas conhecidas para a esfera****tecnológica. Produtos e coprodutos**

	Quantidade	Unidade	Alocação
ESTÉRES ETÍLICOS de mix algal	0,001	m3	47%
Coproducto	0,53	m3	53%

Entradas conhecidas da esfera**tecnológica (materiais/ combustíveis)**

Biomassa seca	2,5	kg	
Ethanol, without water, in 99,7% solution state, from fermentation (BR)	100	kg	

Chloroacetic acid (RoW) / production/ APOS, S	10	kg
Hexane (RoW)/ molecular sieve separation of naphtha / APOS, S	130	kg
Tap water (RoW) market for APOS, S	10	kg
Entradas conhecidas da esfera tecnológica (eletricidade/calor)		
Electricity, high voltage (BR)/ market for/ APOS, S	3494	kWh

Fonte, A AUTORA 2019

3 Resultados

O perfil dos resultados apresentados pelos métodos ReCiPe e TRACI estão apresentados nos gráficos 1 e 2, o valor quantificado na Tabela 3.

Gráfico 1: Perfil ACV do processo “biodiesel de microalgas” método ReCiPe

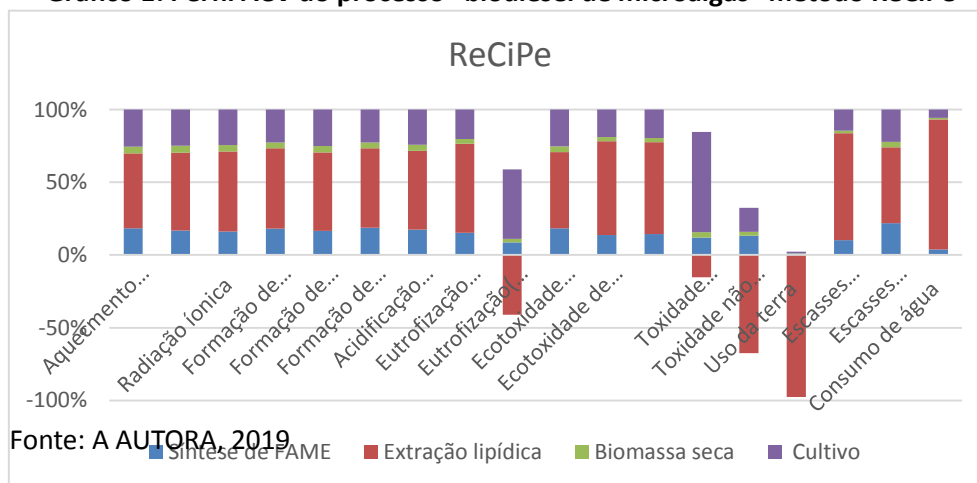
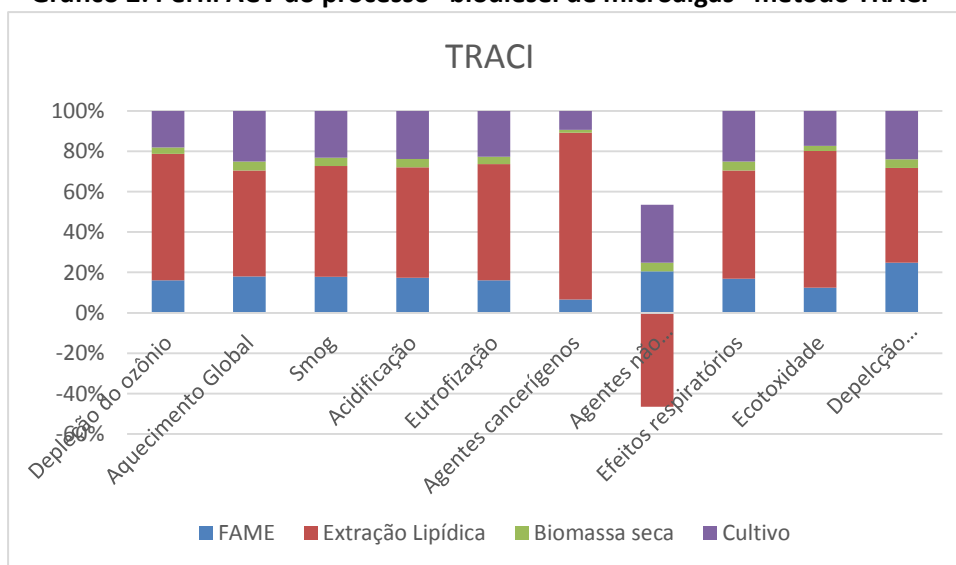


Gráfico 2: Perfil ACV do processo “biodiesel de microalgas” método TRACI



Fonte: A AUTORA, 2019

Tabela 3: Resultados compilados pelo método ReCiPe e TRACI

MÉTODO ReCiPe					
Categorias de Impactos	Unidade	Síntese de ESTÉRES ETÍLICOS	Extração lipídica	Biomassa seca	Cultivo
Aquecimento Global	kg CO2 eq	709	1,99E+03	177	985
Depleção Ozônio Estratosférico	kg CFC 11 eq	0,00084	0,00265	0,000241	0,00124
Radiação iônica	KBq Co-60 eq	43	147	12,1	64,9
Formação de Ozônio (saúde humana)	kg de NOx eq	0,943	2,88	0,206	1,18
Formação de partícula fina	kg PM2.5 eq	0,325	1,06	0,0874	0,493
Formação de Ozônio (ecossistema terrestre)	kg NOx eq	0,998	2,89	0,209	1,2
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	1,86	5,71	0,453	2,56
Eutrofização (água doce)	kg P eq	0,15	0,601	0,0343	0,198
Eutrofização(marinha)	kg N eq	0,00947	-0,045	0,00278	0,0524
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	314	8,90E+02	67,3	431
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	5,67	26,5	1,17	7,74
ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	1,99	8,77	0,414	2,71
Toxidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,126	-0,16	0,038	0,719
Toxidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	2,94	-14,9	0,575	3,63
Uso da terra	m2a crop eq	3,94	-409	0,76	4,91
Escassez recurso mineral	kg Cu eq	0,419	2,99	0,0704	0,592
escassez recurso fóssil	kg oil eq	189	4,53E+02	33,1	193
MÉTODO TRACI					
Categorias de impactos	Unidade	ESTÉRES ETÍLICOS	Extração Lipídica	Biomassa seca	Cultivo
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq	7,19E-05	2,81E-04	1,39E-05	8,13E-05
Aquecimento Global	kg CO2 eq	546	1,59E+03	136	760

Smog	kg O3 eq	22	67,7	4,98	28,6
Acidificação	kg SO2 eq	2,18	6,86	0,527	2,98
Eutrofização	kg N eq	1,24	4,44	0,278	1,75
Agentes cancerígenos	CTUh	1,62E-05	2,02E-04	3,71E-06	2,27E-05
Agentes não cancerígenos	CTUh	6,28E-05	-1,42E-04	1,29E-05	8,76E-05
Efeitos respiratórios	kg PM2.5 eq	0,443	1,4	0,116	0,657
Ecotoxicidade	CTUe	1,75E+03	9,52E+03	373	2,42E+03
Depleção combustível fóssil	MJ surplus	1,12E+03	2,11E+03	188	1,08E+03

FONTE: A autora, 2019

4 Conclusão

Foi possível notar que a produção de microalgas para biocombustíveis é promissora podendo atender a demanda do consumo de combustíveis fósseis. Porém como visto e comprovado as etapas de secagem e extração devem ser revistas e superadas com alternativas à demanda energética e ao uso de solventes e ao meio de cultivo disponibilizado as microalgas, podendo inserir o uso de efluentes como disponibilidade de nutrientes.

Deve-se considerar melhorias como: seleção de cepas, genética, sistemas de engenharia, uso de fotobiorreatores em terras não cultiváveis, tal-qualmente buscar adequações de acordo com o cenário proposto.

Nota-se que a geografia e o cenários estabelecido para uma produção deve ser avaliado isoladamente, pois as influências do meio, tal qual a diferença no perfil da demanda de energia em locais geográficos diferentes gera uma heterogeneidade nos valores e impactos.

Para o cultivo e produção de microalgas, faz-se necessário um balanço energético positivo, assim como avanços tecnológicos e sistemas de produção altamente otimizados.

A mitigação dos impactos ambientais e, em particular, o consumo energético, a gestão do uso dos solventes e a gestão da água, apresentam desafios e oportunidades, muitas das quais só podem ser resolvidas a nível local.

As estimativas de custo existentes precisam ser melhoradas e isso exigirá dados empíricos sobre o desempenho de sistemas projetados especificamente para produzir biocombustíveis. A biorrefinaria pode ser o caminho para se alcançar este equilíbrio.

Os resultados da avaliação do ciclo de vida dos métodos apresentaram similaridade gerando credibilidade nos resultados e melhor interpretação. Porém é necessário a construção de modelos brasileiros para um melhor resultado, embora já há estudos em andamento na alimentação da base de dados.

Vale ressaltar que todas estas conclusões reflete o estado da literatura acadêmica existente e isso é inevitavelmente um reflexo incompleto do status do setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14040: **Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida** - Princípios e estrutura. Brasil, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14044: **Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida** – Requisitos e Orientações. Basil, 2014b.

BP, 2017. BP Statistical **Review of World Energy** June 2017. BP, London

BENNION, E. P.; GINOSAR, D. M.; MOSES, J.; AGBLEVOR, F.; QUINN, J. C. Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways. **Applied Energy**, 2015.

BICALHO, T.; RICHARD, J.; BESSOU, C. Limitations of LCA in environmental accounting for biofuels under RED. **Sustainability Accounting, Management and Policy Journal**, v. 3, n. 2, p. 218–234, 2012.

CHIA, S. R.; CHEW, K. W. 2,3,**. , p. 1–31, 2018.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; STEYER, J. P.; BERNARD, O. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. **Applied Energy**, v. 154, p. 1089–1102, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.056>> .

GOUVEIA, L.; OLIVEIRA, A. C.; CONGESTRI, R.; et al. Biodiesel from microalgae. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**, v. 25, n. 3, p. 235–258, 2017. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>> .

MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. , p. 149, 2013.

RAHEEM, A.; PRINSEN, P.; VUPPALADADIYAM, A. K.; ZHAO, M.; LUQUE, R. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: recent developments. **Journal of Cleaner Production**, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618301471>> .

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. August 2017, p. 743–755, 2018.

SONG, D.; FU, J.; SHI, D. Exploitation of Oil-bearing Microalgae for Biodiesel. **Chinese Journal of Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. 341–348, 2008.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. How do methodological choices affect the carbon footprint of microalgal biodiesel? A harmonised life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 560–568, 2019. Elsevier B.V.

ZHU, L.; NUGROHO, Y. K.; SHAKEEL, S. R.; et al. Using microalgae to produce liquid transportation biodiesel : What is next ? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. May 2016, p. 391–400, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.089>> .

BENNION, E. P.; GINOSAR, D. M.; MOSES, J.; AGBLEVOR, F.; QUINN, J. C. Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways. **Applied Energy**, 2015.

BICALHO, T.; RICHARD, J.; BESSOU, C. Limitations of LCA in environmental accounting for biofuels under

RED. **Sustainability Accounting, Management and Policy Journal**, v. 3, n. 2, p. 218–234, 2012.

CHIA, S. R.; CHEW, K. W. 2,3,**. , p. 1–31, 2018.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; STEYER, J. P.; BERNARD, O. Recommendations for Life Cycle Assessment of algal fuels. **Applied Energy**, v. 154, p. 1089–1102, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.056>>. .

GOUVEIA, L.; OLIVEIRA, A. C.; CONGESTRI, R.; et al. Biodiesel from microalgae. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products**, v. 25, n. 3, p. 235–258, 2017. Elsevier Inc. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>>. .

MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. , p. 149, 2013.

RAHEEM, A.; PRINSEN, P.; VUPPALADADIYAM, A. K.; ZHAO, M.; LUQUE, R. A review on sustainable microalgae based biofuel and bioenergy production: recent developments. **Journal of Cleaner Production**, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618301471>>. .

SHUBA, E. S.; KIFLE, D. Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, n. August 2017, p. 743–755, 2018.

SONG, D.; FU, J.; SHI, D. Exploitation of Oil-bearing Microalgae for Biodiesel. **Chinese Journal of Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. 341–348, 2008.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. How do methodological choices affect the carbon footprint of microalgal biodiesel? A harmonised life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 560–568, 2019. Elsevier B.V.

ZHU, L.; NUGROHO, Y. K.; SHAKEEL, S. R.; et al. Using microalgae to produce liquid transportation biodiesel : What is next ? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. May 2016, p. 391–400, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.089>>. .