

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL

**ANÁLISE TÉCNICA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE  
CULTURAS DE PRODUÇÃO DE MICROALGAS PARA  
BODIESEL**

BRUNO MENEZES GALINDRO

Orientador: Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.  
Co-orientador: Prof. Roberto Bianchini Derner, Dr.

*Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Ambiental*

Florianópolis (SC)  
Agosto, 2012

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), aos funcionários e professores do departamento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro através da concessão de bolsa de estudos.

Ao Professor Sebastião Roberto Soares pela orientação e por proporcionar estrutura para que este trabalho pudesse ser realizado.

Ao Professor Roberto Bianchini Derner e toda a equipe do Laboratório de Cultivo de Algas por viabilizarem e colaborarem na realização dos experimentos deste trabalho.

Aos membros e ex-membros do Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (Ciclog) por suas sugestões e contribuições para a minha pesquisa.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Camarões Marinhos pelo auxílio com dados e esclarecimentos para a minha dissertação.

À minha família e meus amigos, que sempre me incentivaram e me apoiaram. Sem dúvida, vocês foram peças fundamentais para que eu fosse bem sucedido nessa empreitada.

## RESUMO

Uma das alternativas de produção de biodiesel, atualmente, em pauta, é o uso de biomassa de microalgas para a obtenção de lipídios, entretanto, existem alguns processos da sua produção que precisam de mais estudos, tais como os insumos utilizados. Uma das alternativas de matéria-prima para o cultivo é o efluente do cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos (BF). Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi realizar a avaliação técnica e ambiental de diferentes culturas para a produção de microalgas destinadas a biodiesel. Para a avaliação técnica, foi considerada a produção de microalgas utilizando três meios de cultivo: (i) f/2 – elaborado com fertilizantes químicos; (ii) BF – emprego de 100% de efluente e (iii) 50/50 – elaborado com 50% de cada. A produtividade foi avaliada em relação a ganho de biomassa e a acumulação de lipídios e ésteres. Para o desempenho ambiental, foi utilizada a ACV, sendo estabelecida a unidade funcional de 1 kg de biomassa de algas contendo 25% de lipídios, produzida em 30 dias. Os limites do sistema vão da aquisição de matéria-prima até a biomassa seca de algas. Foram propostos cenários de avaliação ambiental semelhantes aos anteriores, sendo BF dividido de acordo com o procedimento de alocação adotado: BFa e BFb. Para Avaliação de Impacto Ambiental, foram consideradas categorias do método CML 2000 e a Demanda Acumulada de Energia. A produtividade de biomassa obtida em BF foi 17,5% superior às demais e, em relação à acumulação de lipídios, os valores foram semelhantes em todos os meios. Porém, a produtividade obtida nesses cultivos foi baixa. O consumo de energia foi o principal responsável também pelos principais impactos ambientais observados, no que se refere à acidificação, toxicidade humana e potencial de aquecimento global, sendo BFb o cenário menos impactante e f/2 o mais impactante. Eutrofização, o cenário BFa foi o mais impactante devido as emissões de nitrato e fosfato e o cenário BFb apresentou impactos positivos, devido a dispensa do tratamento do efluente do cultivo de camarões. Percebe-se que o sistema de produção necessita de modificações a fim de tornar-se viável em escala industrial, especialmente no que se refere ao consumo de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Microalgas. Avaliação de Ciclo de Vida. ACV. Biodiesel. Efluente.

## ABSTRACT

One alternative currently being discussed for biodiesel production is the use of microalgae biomass for obtaining lipids. However, There are some processes of its production which need further study, such as the inputs. One possibility for an alternative raw material is the effluent from superintensive shrimp cultivation with bioflocs (BF). Therefore, the overall objective of this study was to perform technical and environmental evaluation of different cultures for production of microalgae for biodiesel. For technical evaluation, the microalgae were grown in three systems: (i) f/2 - produced integrally with chemical fertilizers, (ii) BF - use of 100% of the effluent and (iii) 50/50 with 50% of each medium. The productivity was evaluated according to the gain of biomass and lipids and esters accumulation. For environmental performance LCA was used and the functional unit was established as 1 kilogram of algae biomass containing 25% fat, produced in 30 days. The system boundaries were defined from the producing of raw materials to the dry algal biomass. The proposed scenarios for the environmental assessment were similar to those proposed before: being BF divided into two allocation procedures: BFa and BFb. The categories considered for environmental impact assessment were some of the CML 2000 and Cumulative Energy Demand. The productivity of biomass obtained in BF was 17.5% higher than the other and the accumulation of lipid values were similar in all the systems. Although, the productivity was low. Energy consumption was primarily responsible for the main environmental impacts observed, as regards acidification, human toxicity and global warming potential, being BFb the less impacting scenario and f/2 the most impacting one. For the eutrophication category, the scenario BFa was the most impacting scenario because of the emissions of nitrate and phosphate, and the BFb scenario showed positive impacts due to release of the effluent treatment of bioflocs. It is observed that the production system still requires changes to become feasible in industrial scale, especially as regards energy consumption.

Key words: Microalgae. Life Cycle Assessment. LCA. Biodiesel. Effluent.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principais matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel. ....	14
Figura 2: Evolução anual da produção de biodiesel no Brasil. ....	15
Figura 3: Pré-teste de cultivo de microalgas da espécie <i>N. oculata</i> . ....	33
Figura 4: Cultivos de <i>N. oculata</i> realizados em cilindros de 120 L ....	34
Figura 5: Densidade celular de microalgas ao longo do pré-teste. ....	37
Figura 6: Biomassa de microalgas ao longo do cultivo. ....	38
Figura 7: DBO nos cultivos de microalgas. ....	42
Figura 8: Nitrogênio amoniacal nos cultivos de microalgas. ....	43
Figura 9: Nitrato nos cultivos de microalgas. ....	44
Figura 10: Ortofosfato nos cultivos de microalgas. ....	44
Figura 11: Fluxograma dos processos elementares de produção de microalgas. ....	49
Figura 12: Fluxograma dos processos elementares de produção de microalgas. ....	57
Figura 13: Impactos gerados em cada categoria nos quatro cenários. ....	64
Figura 14: Impactos da acidificação para os quatro cenários de avaliação. ....	65
Figura 15: Impactos de eutrofização para os quatro cenários de avaliação. ....	67
Figura 16: Impactos do potencial de aquecimento global para os quatro cenários de avaliação. ....	70

Figura 17: Impactos da toxicidade humana para os quatro cenários de avaliação. ....	72
Figura 18: Demanda acumulada de energia para os quatro cenários de avaliação. ....	74

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Composição de 1000 litros de meio f/2 de GUILLARD (1975).....	32
Tabela 2: Parâmetros e métodos utilizados para análise dos cultivos de <i>N. oculata</i> .....	36
Tabela 3: Produtividade média das culturas nos diferentes meios de cultivo.....	39
Tabela 4: Teor de lipídios nos diferentes Meios de cultivo.....	40
Tabela 5: Produtividade por área dos cultivos em relação a lipídios totais e ao teor de ésteres. ....	41
Tabela 6: Parâmetros químicos iniciais e finais dos meios de cultivo de <i>N. oculata</i> .....	42
Tabela 7: Insumos utilizados no cultivo superintensivo de camarão com bioflocos.....	54
Tabela 8: ICV do cultivo de microalgas para os cenários f/2.....	58
Tabela 9: ICV do cultivo de microalgas para o cenário 50/50. ....	59
Tabela 10: ICV do cultivo de microalgas para os cenários BFa e BFb. ....	60
Tabela 11: Fluxos da produção de 1 kg de biomassa. ....	62
Tabela 12: Impactos ambientais dos quatro cenários de produção de microalgas. ....	63
Tabela 13: Contribuição dos fluxos para Acidificação. ....	66
Tabela 14: Contribuição dos fluxos para Eutrofização. ....	68

Tabela 15: Contribuição dos fluxos para Potencial de Aquecimento Global.....	70
Tabela 16: Contribuição dos fluxos para Toxicidade Humana. ....	72
Tabela 17: Contribuição das etapas para a Demanda Acumulada de Energia.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida  
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
BF – Efluente do cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos  
BFT – *Bioflocs Technology* (Tecnologia de Bioflocos)  
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
DB – Dicloro Benzeno  
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
GWP – *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)  
ICV – Inventário do Ciclo de Vida  
ISO – *International Organization for Standardization*  
LCA – Laboratório de Cultivo de Algas  
LCM – Laboratório de Camarões Marinhos  
NBR – Norma brasileira  
PVC – *Polyvinyl chloride* (policloreto de vinil)  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
ZEAH - *Zero Exchange, Aerobic, Heterotrophic Culture Systems*  
(Sistemas de Cultura Heterotróficos, Aeróbicos de Troca Zero)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1 Objetivo geral</b> .....	16
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Microalgas .....	20
2.2 Cultivo superintensivo de camarões marinhos.....	23
2.3 Avaliação do Ciclo de Vida .....	25
2.4 Estudos de avaliação do ciclo de vida do biodiesel.....	27
2.5 Estudos de avaliação do ciclo de vida da produção de microalgas..	28
3 CRESCIMENTO DA MICROALGAS <i>Nannochloropsis oculata</i> EM EFLUENTE DE CULTIVO SUPERINTENSIVO DE CAMARÕES.....	31
3.1 MÉTODOS .....	31
<b>3.1.1 Material Biológico</b> .....	31
<b>3.1.2 Meios de cultivo.</b> .....	31
<b>3.1.3 Desenho experimental</b> .....	32

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
<b>3.2.1 Primeira etapa – Pré-teste.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2 Segunda etapa .....</b>	<b>38</b>
3.2.2.1 Peso seco da biomassa e produtividade.....	38
3.2.2.2 Teor de lipídios totais e ésteres. ....	40
3.2.2.3 Consumo de nutrientes. ....	41
3.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	46
4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CULTIVO DE MICROALGAS.....	47
4.1 MÉTODO.....	47
<b>4.1.1 Escopo do estudo .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.3 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.4 Interpretação.....</b>	<b>56</b>
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
<b>4.2.1 Inventário do Ciclo de Vida .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2 Avaliação de Impacto Ambiental.....</b>	<b>63</b>
4.2.2.1 Acidificação .....	64
4.2.2.2 Eutrofização .....	66
4.2.2.3 Potencial de Aquecimento Global.....	69

4.2.2.4 Toxicidade Humana .....	71
4.2.2.5 Demanda acumulada de energia.....	73
<b>4.2.3 Influência da alocação nos resultados .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.4 Comparação da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida .....</b>	<b>77</b>
4.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	79
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS.....	84

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 30 anos, a questão da utilização de recursos fósseis tem sido motivo de grande preocupação por diversos países, sendo a redução do seu consumo uma meta a ser atingida globalmente. Essa redução é impulsionada por uma série de fatores, tais como a limitação da disponibilidade desses recursos, as altas dos preços do petróleo no mercado internacional, a necessidade de reduzir a dependência dos países consumidores em relação aos produtores e, ainda, a busca pela redução das emissões atmosféricas, a fim de amenizar os efeitos do aquecimento global e dos gases do efeito estufa. Diante desses fatos, a utilização de biocombustíveis surge como uma alternativa que visa à substituição dos combustíveis fósseis (ex: gasolina e óleo diesel) por fontes renováveis de energia, principalmente bioetanol e biodiesel (COM, 2010).

De acordo com Peres e Beltrão (2006), o biodiesel pode ser produzido a partir do cultivo de plantas oleaginosas tais como: óleos vegetais de soja, mamona, palma (dendê), girassol, canola, babaçu, amendoim, pinhão-manso, algodão, coco, além de outras matérias-primas como gordura animal e óleos residuais. No Brasil, a produção de biodiesel é baseada essencialmente no óleo de soja, que atualmente configura-se como a fonte com maiores possibilidades de utilização em função do seu menor preço e maior disponibilidade (MOURAD, 2008). O perfil das matérias primas utilizadas para a produção de biodiesel em 2011 está representado na Figura 1.

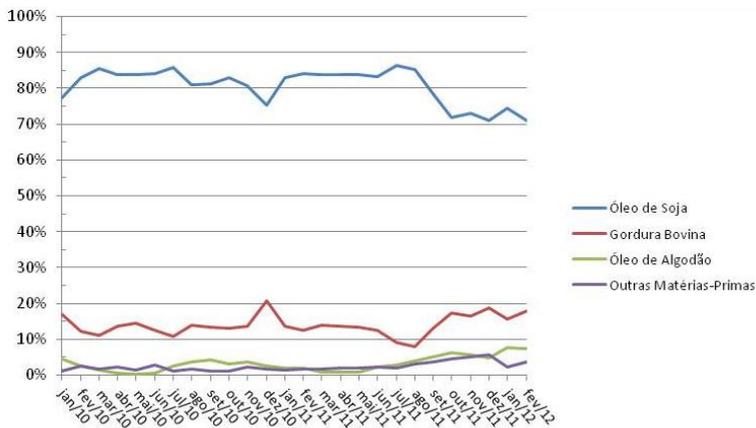


Figura 1: Principais matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel. Fonte: Agência Nacional do Petróleo, 2012.

A produção de biodiesel tem sido incentivada pelo governo federal, principalmente a partir da criação da Lei Federal nº 11.097/2005, que o introduziu na matriz energética brasileira e tornou obrigatória a adição de 2% desse combustível ao diesel comercializado para o consumidor final em todo o território nacional. Essa lei ainda prevê que essa porcentagem de mistura deve atingir a marca de 5% até o ano de 2013. Outro incentivo governamental deu-se a partir da elaboração do Plano Nacional de Agroenergia, que prevê a consolidação dos biocombustíveis como peças importantes na composição da matriz energética brasileira.

Além da soja, outras culturas já são realizadas em estágios iniciais e ainda dependem de avanços tecnológicos, principalmente em relação às técnicas de cultivo e processamento dos grãos, a fim de se tornarem viáveis em larga escala. No entanto, mesmo com as limitações tecnológicas para o desenvolvimento do setor, é possível observar um aumento da produção brasileira de biodiesel nos últimos sete anos, atingindo a marca de 2.600.000 m<sup>3</sup>, produzidos em 2011 e estimando um crescimento ainda maior para os próximos anos (ANP, 2012). A evolução da produção de biodiesel nos últimos sete anos é apresentada na Figura 2.

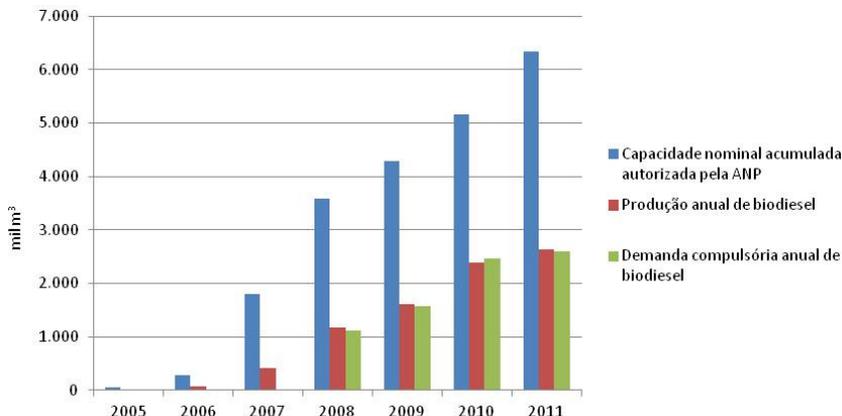


Figura 2: Evolução anual da produção de biodiesel no Brasil.

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, 2012.

De acordo com Wijffels e Barbosa (2010), uma das fontes alternativas de produção de biodiesel são as microalgas, cuja utilização é estudada há mais de 50 anos e, recentemente, vem sendo analisada com maior ênfase. Assim, é considerada a “terceira geração” de matérias-primas para biocombustíveis. As algas são organismos autótrofos que sintetizam matéria orgânica através da fotossíntese, utilizando  $\text{CO}_2$  e luz. As algas podem ser utilizadas para obtenção de elementos essenciais a vida, tais como oxigênio, carboidratos e outros nutrientes. Além disso, algumas cepas de algas podem acumular conteúdo lipídico e amido e, assim, podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de combustíveis (BOROWITZKA, 1994 apud DERNER, 2006).

As microalgas possuem ciclos de crescimento mais curtos, em comparação com as plantas terrestres e, portanto, o potencial de produtividade do biodiesel a partir de algas é maior do que a de culturas terrestres, como a da soja (CHISTI, 2007). Porém, alguns estudos afirmam que o custo energético de produção das algas é superior à energia obtida na utilização dos biocombustíveis provenientes desse processo (SANDER; MURTHY, 2010; CAMPBELL et al., 2011; LARDON et al., 2009; CLARENS et al., 2010).

Um dos entraves do processo produtivo de algas, citados por Lardon et al. (2009), é a utilização de fertilizantes químicos no cultivo das microalgas, sendo responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais e do consumo de energia. O estudo ainda sugere

que, se os fertilizantes químicos fossem substituídos por efluentes de outros processos, haveria uma redução nos impactos ambientais e na demanda de energia no cultivo de microalgas. Por esse motivo, diversos tipos de efluentes têm sido estudados como potenciais meios de cultivo para esses microorganismos, tais como efluentes industriais e domésticos (McGINN et al., 2011).

Uma das possibilidades de insumos alternativos para o cultivo de microalgas é o efluente do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos (BF) que, até o presente momento, é considerado um passivo ambiental, rico em nitrato e fosfato (DE SCHRYVER et al., 2008). Diante do exposto, faz-se necessária a seguinte avaliação: é viável a utilização deste efluente como meio de cultivo para a produção de microalgas para biodiesel? Quais são os impactos ambientais associados a essa utilização em relação ao processo produtivo convencional?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é realizar a análise técnica e a avaliação do ciclo de vida de culturas para produção de microalgas destinadas à extração de biodiesel.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1 - Determinar a viabilidade técnica da utilização de efluentes do cultivo superintensivo de camarões como meio de cultura para microalgas.

2 - Avaliar o desempenho ambiental das culturas de produção das microalgas destinadas à produção de biodiesel, segundo a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida.

3 - Determinar o impacto relativo da substituição dos fertilizantes por efluentes do cultivo superintensivo de camarões como matéria-prima no processo produtivo das algas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O presente estudo foi orientado pelo professor Sebastião Roberto Soares, que desenvolve desde 1999 estudos sobre Avaliação do Ciclo de Vida de diversos produtos e processos. Em 2006, fundou, junto ao CNPq, o Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida que vem desenvolvendo diversas atividades baseadas em ACV, tais como: desenvolvimento de selos de qualidade ambiental de produtos, análise ambiental de cadeias produtivas e avaliações de desempenho ambiental. Entre as pesquisas desenvolvidas no grupo, encontram-se trabalhos envolvendo ACV de produtos da maricultura (GALINDRO et al., 2012). Nesse contexto, esse trabalho busca o aprofundamento dos conhecimentos sobre o ciclo de vida das microalgas para biodiesel e dos impactos ambientais referentes à sua produção.

Por sua vez, esse estudo também contou com a co-orientação do professor Roberto Bianchini Derner, coordenador do Laboratório de Cultivo de Algas (LCA) da Universidade Federal de Santa Catarina, que desenvolve diversas atividades relacionadas ao cultivo de microalgas de diferentes espécies desde 1998, possuindo indiscutível domínio sobre essas técnicas e contribuindo para o desenvolvimento dessa área de pesquisa científica (DERNER et al., 2006).

A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, utilizando modelos de processos produtivos cada vez mais sustentáveis e que utilizem racionalmente os recursos naturais, é uma meta perseguida por várias nações. Por isso, é preciso avaliar o setor de forma a se identificar todas as etapas envolvidas na sua produção e se obter um retrato fiel dos impactos ambientais dessa substituição, de modo a permitir a interferência nos pontos críticos. Percebe-se que, apesar do grande crescimento e desenvolvimento da produção do biodiesel, sua viabilidade ainda é um tema controverso.

Diversos estudos têm questionado a utilização dos biocombustíveis como alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, afirmando que embora o uso dessa tecnologia reduza a demanda por combustíveis fósseis, ela pode gerar impactos ambientais negativos. Entre os principais impactos citados estão o aumento da aplicação de pesticidas e fertilizantes nas lavouras e a substituição gradativa dos cultivos de alimentos por cultivos destinados a biocombustíveis,

gerando expansão de áreas cultivadas e competição no uso de solo agrícola (CRUTZEN et al., 2008).

O uso de microalgas para esta finalidade é uma alternativa atualmente em pauta. Entretanto, a necessidade de fertilizantes ricos em nitrogênio e fósforo pode inviabilizar a sustentabilidade do setor. O estudo de Lardon et al., (2009) indica uma necessidade de redução de impactos ambientais associados ao grande consumo de energia e de fertilizantes no processo produtivo das microalgas. O estudo de Clarens et al., (2010) afirma que, se parte dos fertilizantes utilizados no processo fosse substituídos por efluentes parcialmente tratados, haveria uma redução nos impactos ambientais desse processo.

Percebe-se que, embora existam estudos que citam o uso de efluentes como uma alternativa para reduzir os impactos da produção das microalgas, ainda se fazem necessários estudos de viabilidade técnica da realização desses cultivos utilizando diferentes meios de cultura. Além disso, é importante a realização trabalhos que avaliem toda a cadeia das microalgas por meio de uma visão do ciclo de vida, principalmente comparando os impactos entre os diferentes sistemas, de modo que esta dissertação visa contribuir para essa lacuna.

Para a realização do presente trabalho, foi utilizado o efluente proveniente do cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos do Laboratório de Camarões Marinhos (LCM), do Departamento de Aquicultura do Centro de Ciências Agrárias da UFSC. Essa escolha deveu-se à disponibilidade e acessibilidade desse material em virtude da parceria existente entre o LCA e o LCM que desenvolve essa modalidade de cultivo. A espécie de microalga escolhida para o desenvolvimento deste trabalho foi *Nannochloropsis oculata*, devido à disponibilidade das cepas e notável conhecimento dos profissionais do LCA sobre a sua biologia e suas técnicas de cultivo.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação foi elaborada em cinco capítulos. O primeiro capítulo trata de introdução geral, objetivos e justificativa. O segundo, é referente à revisão bibliográfica, discutindo conceitos importantes para o trabalho. O terceiro refere-se à viabilidade técnica do cultivo de algas em efluente de bioflocos, respondendo ao objetivo específico número 1.

O quarto capítulo trata da avaliação ambiental do cultivo, utilizando a metodologia de ACV, respondendo aos objetivos específicos 2 e 3. Por fim, o capítulo cinco refere-se a considerações finais e recomendações.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordados conceitos importantes para a compreensão dos temas discutidos no presente estudo, especialmente no que se refere a microalgas, cultivo superintensivo de camarões marinhos e Avaliação do Ciclo de Vida. Além disso, será apresentado um levantamento dos principais estudos de ACV do biodiesel e ACV da produção de microalgas.

### 2.1 Microalgas

O termo **microalgas** refere-se a organismos de diferentes reinos taxonômicos dentro do sistema de classificação dos seres vivos e, por isso, é considerado um agrupamento artificial. Em comum, essas espécies apresentam a estrutura unicelular e a capacidade de produzir seus próprios compostos energéticos através da fotossíntese. Neste grupo, estão incluídos seres procariontes (Reino Monera, ex: cianobactérias) e seres eucariontes (Reino Protista) (RAVEN et al, 2001).

As microalgas podem ser encontradas em meio terrestre ou aquoso, tanto em água doce quanto salgada, e desempenham uma importante função como produtoras primárias de matéria orgânica do planeta, destacando-se nesse sentido as microalgas oceânicas que integram o fitoplâncton (CHISTI, 2004).

De acordo com Raven et al. (2001), a fotossíntese é o processo biológico realizado pelas algas que utiliza energia luminosa, gás carbônico (CO<sub>2</sub>) atmosférico e água para produzir a glicose, um carboidrato com função energética para os seres vivos. Esse processo é fundamental para o equilíbrio dos gases atmosféricos, pois ele fixa o carbono inorgânico da atmosfera, convertendo-o em carbono orgânico constituinte da molécula de glicose e liberando oxigênio (O<sub>2</sub>) para o ambiente.

Por esses motivos, as microalgas são consideradas base de diversas cadeias alimentares. Parte dessa energia produzida é assimilada pelos organismos que as utilizam como principal fonte de alimentação, especialmente peixes, moluscos e crustáceos, denominados

consumidores primários, garantindo o fluxo de energia ao longo das cadeias tróficas (ARREDONDO-VEGA, 1995).

Os cultivos de algas vêm sendo estudados desde o século XIX no mundo inteiro e, a partir da metade do século XX, no Brasil. As microalgas podem ser cultivadas em ambientes controlados para fins comerciais, especialmente para a extração de compostos bioquímicos como ácidos graxos poliinsaturados, corantes, enzimas, etc (BOROWITZKA, 1994 apud DERNER, 2006). Esses cultivos podem ser realizados de diversas formas, em diversos volumes de cultura e, segundo Richmond (2004) e Clarens et al. (2010), são mais vantajosos que os cultivos de plantas terrestres por alguns fatores tais como:

- Um cultivo de microalgas é um sistema biológico eficiente na utilização da energia solar para a produção de matéria orgânica, sendo que muitas espécies crescem mais rapidamente que as plantas terrestres por unidade de área, fato que possibilita maiores rendimentos de biomassa (maior produtividade);

- Sua natureza unicelular assegura uma biomassa com mesma composição bioquímica, o que não ocorre nas plantas terrestres que apresentam compostos localizados em partes específicas: nos frutos, folhas, sementes ou raízes;

- Por manipulação das condições ambientais de cultivo (*e.g.* luz, temperatura, nutrientes), muitas espécies podem ser induzidas a sintetizar e acumular altas concentrações de proteínas, carboidratos, lipídios etc. Tais compostos apresentam um elevado valor comercial, principalmente por serem produtos naturais;

- Podem crescer bem em regiões com extremas condições climáticas. Os cultivos podem ser desenvolvidos com água marinha ou de estuários, a qual não pode ser convencionalmente empregada no cultivo de plantas com valor para a agricultura, ou com água proveniente de diversos processos de produção (agropecuária, industrial e dejetos domésticos, por exemplo).

- Os cultivos de microalgas não competem diretamente com culturas de produtos agrícolas (CHISTI, 2007);

- Devido a sua rápida taxa de crescimento e *habitat* aquático, podem ser cultivadas em sistemas desenvolvidos para absorção de CO<sub>2</sub> e remoção de certos poluentes (POWELL et al, 2008).

De acordo com Lourenço (2006), unidades de cultivo comercial são tipicamente de grande porte, a fim de produzir grande quantidade de biomassa. Elas podem ser instaladas ao ar livre, em lagoas abertas, ou em ambiente fechado, principalmente em fotobiorreatores. A realização

de cultivos em fotobiorreatores proporciona maior controle de fatores ambientais, como temperatura, que tende a variar menos em ambiente fechado, havendo ainda a possibilidade de ajustes por meio de sistemas de refrigeração ou aquecimento. Além disso, os cultivos em fotobiorreatores reduzem a contaminação por microrganismos. Entretanto, a criação desse ambiente de cultivo envolve mais gastos com infraestrutura básica, bem como gastos relativos ao aproveitamento da luz solar, que diminui parcial ou totalmente, havendo necessidade de lâmpadas fluorescentes para fornecer energia às microalgas. Cultivos em lagoas abertas tendem a envolver menos gastos, mas são menos controlados, estando sujeitos a variações de temperatura e iluminação.

De modo geral, as microalgas podem ser cultivadas em diferentes tipos de cultivo, com diversos volumes, desde pequenos frascos de poucos litros até cultivos a céu aberto em tanques de bilhões de litros (BOROWITZKA, 1994 apud DERNER, 2006). Atualmente, os estudos envolvem principalmente as possibilidades de aplicação das algas, tais como: uso na alimentação humana e animal, extração de substâncias de importância farmacêutica, produção de cosméticos, utilização como indicadores ambientais, etc (LOURENÇO, 2006).

Dentre as espécies de microalgas avaliadas na busca da identificação de potenciais produtoras de biodiesel, destacam-se as espécies dos gêneros *Chlorella* e *Nannochloropsis* devido a sua grande taxa de acumulação de lipídios (SINGH e GU, 2010). No entanto, o cultivo de microalgas convencional utiliza-se de fertilizantes a base de nitrogênio e fósforo como principais fontes de nutrientes, o que pode ser considerado um entrave desse processo produtivo por gerar grandes encargos ambientais (LARDON et al, 2009).

Uma alternativa à utilização de fertilizantes para a produção de microalgas é o uso de efluentes, quando esses são utilizados como matéria-prima, conforme corroboram Subhadra e Edwards (2010). A aplicação desses elementos como meio de cultivo para as algas reduziria a utilização de fertilizantes no processo e poderia resultar em redução dos impactos ambientais, no que se refere à diminuição da necessidade de tratamento e disposição final desses efluentes. No entanto, Clarens et al., (2010) destacam que são necessárias avaliações ambientais mais consistentes sobre o verdadeiro potencial de utilização de efluentes de algum outro processo produtivo, como matéria-prima e meio de cultivo para a produção de microalgas.

Segundo McGinn et al. (2011), os estudos mais recentes de produção de microalgas tem avaliado a possibilidade de integração do

cultivo de microalgas com outras atividades, especialmente industriais, a fim de utilizar os efluentes gerados por esses processos produtivos como matéria prima para a produção de biomassa algal. Esse processo tem por objetivo principal mitigar os impactos ambientais gerados pelas indústrias, no que se refere à geração de efluentes e reduzir o consumo de fertilizantes para a produção das algas. O trabalho afirma que as microalgas apresentam grande potencial para remoção de nitrogênio, fósforo e metais de efluentes industriais e domésticos. Percebe-se que, embora existam estudos que citam o uso de efluentes como uma alternativa para reduzir os impactos da produção das microalgas, ainda se fazem necessários estudos de viabilidade técnica e ambiental da realização desses cultivos utilizando diferentes meios de cultura.

## 2.2 Cultivo superintensivo de camarões marinhos

O início da carcinocultura no Brasil data da década de 70 no Rio Grande do Norte. No mesmo período, o Estado de Santa Catarina também desenvolveu pesquisas sobre reprodução em cativeiro, larvicultura e engorda do camarão cultivado e conseguiu produzir as primeiras pós-larvas em laboratório na América Latina (SEBRAE, 2012).

Deste então, a criação de camarões marinhos no Brasil veio se expandido rapidamente nos últimos 20 anos. Esta cultura tem sido um bom investimento para diversos maricultores, apesar da complexidade no manuseio e do potencial impacto ambiental negativo deste tipo de sistema, através da utilização de práticas de cultivo não sustentáveis (SANCHES et al., 2008). Esses fatores tornaram a carcinocultura alvo de atenção de órgãos nacionais e internacionais de defesa ambiental. O camarão marinho brasileiro tinha grande aceitação no mercado internacional. Entretanto, alguns fatores, como o surto do vírus da mancha branca em Santa Catarina, colaboraram para que a participação no mercado fosse reduzida, fazendo com que os produtores buscassem alternativas de produção mais limpa e sustentável (SEBRAE, 2012).

Os cultivos superintensivos de organismos aquáticos sem renovação de água através de uma biota predominantemente aeróbica e heterotrófica (ou em inglês, Zero Exchange, Aerobic, Heterotrophic Culture Systems-“ZEAH”) vêm surgindo como uma alternativa na aqüicultura mundial (EMERENCIANO et al., 2007). Esse sistema

baseia-se na formação de estruturas denominadas bioflocos (BFT, Bioflocs Technology), que são gerados a partir da fertilização do ambiente de cultivo com fontes ricas em carbono e forte oxigenação (AVNIMELECH, 2006). Quando corretamente balanceados, o carbono e o nitrogênio estimulam a formação de flocos microbianos, constituídos principalmente de bactérias, microalgas, fezes, exoesqueletos, restos de organismos mortos, cianobactérias, protozoários, pequenos metazoários e formas larvais de invertebrados. Esses bioflocos são capazes de assimilar os compostos nitrogenados originados da excreção dos camarões e dos restos do alimento em decomposição, colaborando para a redução do teor de amônia presente no meio, que é tóxica para os camarões (SCHNEIDER et al., 2006).

Os sistemas “ZEAH” podem, também, reduzir o risco de introdução e disseminação de doenças, além de incrementar a dieta dos animais através da produtividade natural presentes nos viveiros (BURFORD et al., 2003). Alguns autores relatam a importância e as vantagens da aplicação destes sistemas inovadores, descrevendo incrementos significativos na taxa de produção (HOPKINS et al., 1995; BROWDY et al., 2001).

Uma das vantagens desse sistema é que ele prioriza o menor uso de água, através da redução da renovação (troca de água), o que representa uma diminuição na emissão de efluentes e conseqüentemente reduz o impacto ambiental. Sendo assim, a implantação destes sistemas de cultivo atende as premissas de uma carcinocultura responsável e ambientalmente mais correta (EMERENCIANO et al., 2007). No entanto, ao fim do período de cultivo dos camarões, é gerado um efluente com alta carga ambiental, especialmente de nitrogênio e fósforo. Dessa forma, podem ocorrer impactos ambientais e há a necessidade da realização de tratamento desse efluente para sua posterior liberação para o corpo receptor, o que também acarreta em encargos ambientais (DE SCHRYVER et al., 2008).

Há, porém, a possibilidade de integração do cultivo superintensivo de camarões marinhos com o de microalgas, promovendo a utilização desse efluente no cultivo das algas, a fim de remover parte dos nutrientes dissolvidos na água e contribuir na produção desses organismos. Tal aplicação ainda necessita de estudos adequados de viabilidade técnica e ambiental.

### 2.3 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia entre várias técnicas de avaliação ambiental que possibilita a avaliação comparativa dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto (ABNT, 2009a). Especificamente, neste trabalho, a ACV contribui para a verificação da viabilidade ambiental da produção das microalgas à base de fertilizantes químicos comparativamente à produção de microalgas com aproveitamento de efluentes como fonte de nutrientes.

Esse método permite quantificar os fluxos de entrada e saída de matéria e energia ao longo de toda a cadeia produtiva, associando esses fluxos a categorias de impacto e apontando as etapas mais impactantes de cada processo (CHEHEBE, 1998). Também se podem indicar pontos da cadeia produtiva que poderiam ser alterados de forma a reduzir os impactos ambientais gerados.

A substituição das fontes de matéria-prima para a produção de microalgas implica em alterações na geração de impactos ambientais nas várias fases associadas a esse processo. Estas fases podem ser resumidas em: produção da matéria prima, produção das microalgas e extração do biodiesel. De modo que os impactos ambientais devem ser avaliados sob esta perspectiva, incluindo todas as fases associadas ao seu simples uso. Neste sentido, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é particularmente interessante, visto que permite determinar os impactos ambientais de todas as fases.

A ACV foi inicialmente desenvolvida para aplicação nas indústrias, mas também vem sendo utilizada para análise de produção em outras áreas. A ACV tem se mostrado uma metodologia viável para análise de impactos em sistemas agrícolas, bem como de processos produtivos. Especificamente para os biocombustíveis e para as microalgas há variadas aplicações e abordagens já realizadas.

Esta metodologia permite a avaliação de desempenho ambiental de cenários estabelecidos (localização de pontos significativos) e a comparação de alternativas para a otimização do sistema. A determinação de impactos ambientais para os diferentes cenários a serem estudados contribui para a compreensão do quadro atual e pode indicar estratégias para governantes e atores em busca da sustentabilidade do setor, em particular no atendimento às

conformidades dos mercados interno e externo e o desenvolvimento de processos inovadores da gestão das cadeias produtivas.

A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) define a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto, serviço ou atividade, ao longo de seu ciclo de vida. Avaliações do ciclo de vida podem ser utilizadas para suporte à decisão ou como modo de melhor compreender a magnitude e a origem dos impactos ambientais (SCHMIDT, 2008).

Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV pode ajudar:

- Na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- Na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou reprojeção de produtos ou processos);
- Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;
- No marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV inclui quatro fases:

- Definição do objetivo e escopo do estudo;
- Análise do inventário;
- Avaliação de impacto;
- Interpretação.

Segundo Schmidt, (2008), é na fase da definição do objetivo e do escopo que se dá a razão principal para a condução do estudo, sua abrangência e limites, a unidade funcional, a metodologia e os procedimentos considerados necessários para a garantia da qualidade do estudo e que deverão ser adotados e definidos. Nessa fase, também são definidas as características de performance do produto a ser modelado, ou seja, sua função. A quantificação dessa função identificada é

chamada unidade funcional e a sua medição é chamada de fluxo de referência.

A análise de inventário é a fase de coleta e quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes, resíduos sólidos, etc), envolvidas durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (CHEHEBE, 1998).

A fase de avaliação de impacto é a etapa em que, a partir da análise de inventário, os impactos ambientais são avaliados qualitativamente e quantitativamente, buscando-se avaliar a magnitude e a significância deles. O nível de detalhe, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo (ABNT, 2009a).

Por sua vez, a fase de interpretação é onde as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinadas, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão (ABNT, 2009a).

## 2.4 Estudos de avaliação do ciclo de vida do biodiesel

Na bibliografia podem ser encontrados alguns estudos de cenários de produção e uso de biodiesel por meio da ACV. Os estudos de ACV do biodiesel de soja mostraram uma redução significativa de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e do consumo de energia fóssil quando substituído o diesel convencional pelo biodiesel (KIM e DALE, 2005; MAJER et al., 2009; REINHARD e ZAH, 2009; HUO et al., 2009).

Outros estudos também examinaram impactos do ciclo de vida do biodiesel em outros aspectos ambientais, incluindo uso do solo, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, potencial de aquecimento global, toxicidade humana e ecotoxicidade (KIM e DALE, 2005; PANICHELLI et al., 2009).

Em relação ao Brasil, os estudos de ACV do biodiesel ainda são escassos. Os trabalhos resumem-se a uma análise do balanço energético e da emissão de CO<sub>2</sub> quanto há a substituição de uma parte do diesel comum pelo biodiesel (MOURAD, 2008). Existem, também, alguns trabalhos que avaliam possibilidades de produção de biodiesel a partir do cultivo de outras oleaginosas, mais especificamente girassol (VIANA, 2008) e palma (MARZULLO, 2008; VIANNA, 2006). Nesses

estudos, há fortes indícios de que esses cultivos podem ser mais vantajosos do que o da soja, sob o ponto de vista de desempenho econômico e ambiental.

Diversos estudos nacionais e internacionais apontam que tanto o biodiesel da soja quanto o de outras oleaginosas são viáveis economicamente e sob o ponto de vista de redução dos GEE e do consumo de combustíveis fósseis (MOURAD, 2008; MAJER et al., 2009). No entanto, alguns autores indicam que impactos como acidificação, eutrofização, toxicidade humana e ecotoxicidade são acentuados quando optamos pelo uso do biodiesel, embora essas questões sejam bastante peculiares e afetadas por características específicas dos locais no qual o estudo está sendo conduzido (KIM e DALE, 2005; PANICHELLI et al., 2009).

## **2.5 Estudos de avaliação do ciclo de vida da produção de microalgas**

Com relação à ACV de microalgas, os estudos já realizados apontam uma série de gargalos do processo produtivo que ainda inviabilizam a produção de biodiesel de microalgas em escala industrial (LARDON et al., 2009; CLARENS et al., 2010; CAMPBELL et al., 2011; SANDER e MURTHY, 2010).

O estudo de Sander e Murthy (2010) cita o processo de produção de microalgas como de elevada emissão de CO<sub>2</sub> e grande consumo de energia, citando a fase de multiplicação como umas das principais contribuintes para tal fato.

Em seu estudo, Singh e Olsen (2011) afirmam que devem ser feitas melhorias significativas na eficiência e na estrutura produtiva, além de ampliar a capacidade de crescimento das algas e da extração de lipídios para produzir biocombustíveis comercialmente viáveis.

Campbell et al. (2011) indicam que a utilização de microalgas para a produção de biodiesel é economicamente viável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes da Austrália, de acordo com as condições favoráveis de solo, a tecnologia atual e as altas taxas de crescimento anual.

Por outro lado, Pardo et al. (2010) afirmam que a distribuição e uso do biodiesel causam uma sobrecarga ambiental significativa em relação a diversos tipos de poluentes. Também foi relatado um alto

consumo de energia não renovável que ocorre nas etapas de produção de matérias-primas envolvidas no processo.

O trabalho de Clarens et al. (2010) aponta que os impactos do ciclo de vida de cultivo de algas são sensíveis as várias entradas, tais como a disponibilidade de fontes renováveis de nutrientes e de gás carbônico. Em contraste, o modelo é, em geral, insensível à disponibilidade de água e de luz solar, além do que, para reduzir os impactos do cultivo de algas para torná-lo competitivo com culturas terrestres, os produtores terão de usar algum tipo de resíduo como matéria prima no processo produtivo.

Nesse sentido, o estudo de Lardon et al. (2009) relata que os fertilizantes apresentam grande contribuição no que diz respeito aos impactos ambientais, e que, quando os fluxos de fertilizantes são reduzidos, diversos impactos são amenizados. Além disso, o trabalho também aponta o reaproveitamento de efluentes como uma alternativa para redução do consumo energético dessa produção.

Quanto a estudos referentes à Avaliação do Ciclo de Vida de microalgas para biodiesel no Brasil, foi identificado apenas o trabalho de Jorquera et al. (2010), que compara a produção de microalgas em lagoas abertas com a produção em fotobiorreatores. O estudo diz que ambos os processos podem ser considerados economicamente viáveis para o cultivo em massa da microalga *Nannochloropsis sp.*, para fins de geração de biocombustíveis.

A revisão bibliográfica sobre ACV de microalgas demonstrou que, de modo geral, os resultados são bastante discutidos sob uma perspectiva energética da avaliação, comparando o custo em megajoules para a produção do biodiesel com o rendimento líquido dessa energia em forma de combustível (CLARENS et al, 2010; JORQUERA et al, 2010; COLLET et al, 2011).

Em sua maioria, os resultados demonstraram que o custo energético para a produção das microalgas, nos atuais moldes de produção, ainda é mais elevado do que o rendimento energético dos biocombustíveis produzidos. Também apresentaram como principais gargalos do processo produtivo a etapa de produção de fertilizantes, para utilização como meio de cultivo, e a etapa de separação da biomassa algal (COLLET et al, 2011; CLARENS et al 2010; CHISTI, 2007; SANDER e MURTHY, 2010; CAMPBELL et al, 2010; PARDO et al, 2010; JORQUERA et al, 2010; LARDON et al, 2009).

Com relação a emissões de gases causadores do aquecimento global, Sander e Murthy (2010) e Campbell et al. (2010) avaliaram a

questão da fixação e das emissões de gás carbônico ao longo das etapas do ciclo de vida. O estudo de Lardon et al. (2009) considerou além de Demanda de Energia e Potencial de Aquecimento Global, outras categorias de impacto, tais como: Eutrofização, Acidificação, Uso de Solo, Toxicidade Humana e Marinha, entre outras.

Singh e Gu (2010) afirmam que ainda não está disponível um estudo de ACV adequado para a produção de microalgas, pois não há dados de plantas comerciais disponíveis e esses dados colaborariam para que se obtivesse um quadro mais claro da situação. O presente trabalho é baseado principalmente em dados reais obtidos diretamente do LCA que possui uma grande capacidade produtiva e, dessa forma, contribui para o desenvolvimento dos estudos nessa área.

### **3 CRESCIMENTO DA MICROALGA *Nannochloropsis oculata* EM EFLUENTE DE CULTIVO SUPERINTENSIVO DE CAMARÕES**

O capítulo, a seguir, trata do procedimento de avaliação técnica da viabilidade do cultivo de microalgas em efluente de cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos, em comparação com o meio de cultivo tradicional à base de fertilizantes químicos. As avaliações foram realizadas sob o ponto de vista de ganho de biomassa, acumulação de lipídios, produtividade por área e consumo de nutrientes.

#### **3.1 MÉTODOS**

##### **3.1.1 Material Biológico**

A espécie de microalga escolhida para o presente estudo foi a *Nannochloropsis oculata*, que é uma alga verde, unicelular, de ambiente marinho e largamente utilizada como fonte de alimento de larvas de camarões. Por apresentar grande potencial de acúmulo de lipídios, essa microalga também tem sido estudada como potencial fonte de ácidos graxos para a produção de biodiesel (CHIU et al., 2009).

##### **3.1.2 Meios de cultivo.**

Foi utilizado o meio de cultivo denominado f/2 de Guillard (GUILLARD, 1975) adaptado no Laboratório de Camarões Marinhos, usualmente empregado no cultivo de espécies microalgais marinhas no Laboratório de Cultivo de Algas, conforme descrito na Tabela 1. O meio de cultura foi esterilizado em autoclave a 125°C, numa pressão de 1,3 kgf/cm<sup>2</sup>, durante 30 minutos e, em seguida, mantido em ambiente asséptico.

Como meio alternativo, foi testada a fração líquida do efluente de cultivo de camarões marinhos com bioflocos, pré-tratado com um processo de decantação e filtração superficial de maneira a diminuir o

material particulado em suspensão e reter parte da microbiota contida no meio. Ainda foi testada uma alternativa que utilizou 50% de cada um dos meios de cultivo citados anteriormente. Dessa forma, os meios de cultivo apresentaram a seguinte configuração:

- **Meio f/2:** 100% f/2. O volume de cada unidade experimental foi composto inteiramente de meio f/2 de Guillard.

- **Meio 50/50:** 50% f/2 e 50% efluente pré-tratado. O volume de cada unidade experimental foi composto por partes iguais de meio f/2 de Guillard e o efluente pré-tratado citado anteriormente.

- **Meio BF:** 100% Efluente pré-tratado do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos. O volume de cada unidade experimental foi composto integralmente pelo efluente pré-tratado citado anteriormente.

Tabela 1: Composição de 1000 litros de meio f/2 de GUILLARD (1975).

<b>Reagente</b>	<b>Massa</b>
Água salgada	1000 kg
Nitrato de Sódio (NaNO <sub>3</sub> )	97,5 g
Cloreto de ferro hidratado (FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O)	5,2 g
Acido etilenodiamino tetra-acético (EDTA Na <sub>2</sub> )	6,5 g
Cloreto de zinco hidratado (ZnCl <sub>2</sub> .7H <sub>2</sub> O)	0,0143 g
Cloreto de cobalto hidratado (CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O)	0,013 g
Molibdato de amônio hidratado ((NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O)	0,0052 g
Sulfato de cobre hidratado (CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O)	0,01274 g
Cloreto de manganês hidratado (MnCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O)	0,234 g
Fosfato monobásico de sódio hidratado (NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O)	10,4 g
Tiamina (Vitamina B1)	0,13 g
Biotina (Vitamina B7)	0,00065 g
Cianocobalamina (Vitamina B12)	0,00065 g

Fonte: GUILLARD (1975)

### 3.1.3 Desenho experimental

O ensaio foi dividido em duas etapas. A primeira etapa caracterizada como pré-teste e a segunda etapa que representou o experimento final.

O pré-teste foi constituído de cultivos em unidades experimentais contendo os diferentes meios em cada uma delas (f/2, 50/50 e BF) com 4 repetições cada, totalizando 12 unidades experimentais. Os meios de cultura foram dispostos em frascos tipo Erlenmeyer de borossilicato com um volume de 2 L, previamente desinfectados com solução de ácido clorídrico 3,3% e autoclavados. Essas unidades foram compostas por: 1,12 L de meio cultura (f/2, efluente pré-tratado ou 50% de cada) mais 0,48 L de inóculo (cultura) de *N. oculata* perfazendo 1,6 L de volume final (Figura 3).



Figura 3: Pré-teste de cultivo de microalgas da espécie *N. oculata*.

A cultura empregada como inóculo foi crescida em meio f/2 durante 04 dias, com temperatura controlada de 20°C, iluminada continuamente (fotoperíodo 24:0) por 4 lâmpadas de 40 W e aerada com ar atmosférico (proveniente de um compressor de ar) com 3% de suplementação de CO<sub>2</sub>.

As unidades experimentais do pré-teste foram mantidas em ambiente fechado, sem regulação de temperatura e de iluminação, com aeração constante gerada por um compressor de ar. Diariamente, foram monitorados em cada unidade: pH e temperatura com medidor portátil e densidade celular, através de contagem direta das células microalgais em microscópio óptico, com auxílio de Câmara de Neubauer. O ensaio de crescimento foi mantido até que as culturas alcançassem a fase estacionária de crescimento.

Na segunda etapa do ensaio, os meios de cultivo foram os mesmos utilizados na primeira etapa do experimento, porém utilizando um volume de cultura maior para que fosse realizada a extração da biomassa ao fim do experimento.

O volume de cada unidade experimental foi acondicionado em cilindros de fibra de vidro, com capacidade de 120 L, previamente esterilizados com solução de hipoclorito de sódio (NaClO) de solução 0,25% e neutralizados com solução de tiosulfato de sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Essas unidades foram compostas por 70 L de meio de cultura (f/2, 50/50

ou BF), mais 30L de inóculo de *N. oculata*, totalizando 100 L de volume final (Figura 4). Os cilindros do experimento foram mantidos em ambiente fechado, sem regulação de temperatura e iluminação, com aeração constante gerada por um compressor de ar sem suplementação de CO<sub>2</sub>. O ensaio de crescimento foi mantido até que as culturas atingissem a fase estacionária de crescimento.



Figura 4: Cultivos de *N. oculata* realizados em cilindros de 120 L

A densidade celular foi monitorada utilizando-se o mesmo método proposto no pré-teste. Também foi avaliado, durante todos os dias do experimento, o peso seco da biomassa, com o auxílio de filtros de fibra de vidro, que foram inicialmente pesados e utilizados para filtração de um volume de 10 mL de amostra. Posteriormente, esses filtros foram lavados com formiato de amônio para a retirada do sal presente na amostra e secados em estufa a 60°C, sendo pesados novamente. Através da diferença do peso do filtro antes e após a filtração pôde-se obter a estimativa do peso seco da biomassa filtrada. Com esses dados, foram construídas as curvas de crescimento.

A produtividade volumétrica dos cultivos foi calculada em gramas por litro por dia (peso seco), empregando a seguinte equação:

$$P = (X_t - X_0)/(t-t_0)$$

onde:

$X_0$  – concentração celular inicial do cultivo – (g/L)

$X_t$  – máxima concentração celular obtida no cultivo – (g/L)

$t_0$  – tempo inicial – (dias)

$t$  – tempo transcorrido desde o início do cultivo até ser alcançada a  $X_t$  (dias)

A produtividade por área foi calculada em gramas por metro quadrado por dia (peso seco), considerando uma relação de 200 L por metro quadrado de área iluminada (superfície).

Ao final do experimento, foi extraída a biomassa do cultivo, através do método de floculação. Foi adicionada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH, 2N) até que o cultivo atingisse o pH de 10,5 e, em seguida, foi feita a aeração por 10 minutos. Posteriormente, o cultivo foi mantido em repouso, sem aeração, por 24 horas e, após este período, foi retirada a fração líquida sobrenadante por sifonamento, com o auxílio de uma mangueira sifão. O restante do material foi colocado em estufa para secagem por mais 24 horas até que restasse apenas a fração sólida (sedimentada), compondo, assim, a biomassa seca de microalgas. Esse material foi encaminhado para análise do teor de lipídios presentes na amostra, a fim de verificar se há diferença na acumulação de lipídios nas células microalgais, em função dos diferentes meios de cultivo.

A extração dos lipídios foi baseada no método descrito por Zhu et al (2002). As extrações foram realizadas a partir de ~0,5 g da biomassa finamente moída e 3 mL de solvente, mistura de clorofórmio e metanol na proporção 2:1 (v/v). As extrações foram conduzidas submetendo as amostras a agitação em banho de ultrassom por 20 minutos. Em seguida, a fase do solvente contendo a fração lipídica foi separada da biomassa por centrifugação. Para cada amostra, este procedimento de extração foi repetido mais duas vezes. Ao final, a biomassa foi lavada com o solvente extrator e o solvente das frações orgânicas foi evaporado. A fração lipídica foi seca em estufa a 60°C até que atingisse peso constante. Os ensaios foram realizados em triplicata a temperatura ambiente e o rendimento da extração foi determinado em porcentagem em relação à massa seca.

Na segunda etapa do experimento, foram coletadas amostras representativas (200 mL) de cada meio de cultivo no início e no fim do experimento e encaminhadas para o Laboratório Integrado de Meio Ambiente da UFSC, onde foram quantificados os nutrientes dissolvidos nas unidades experimentais. Os parâmetros físico-químicos analisados e os respectivos métodos de análise estão descritos na Tabela 2. Todos os procedimentos seguem APHA/AWWA/WEF, 2005.

Tabela 2: Parâmetros e métodos utilizados para análise dos cultivos de *N. oculata*

<b>Parâmetros Físico-Químicos</b>	<b>Métodos</b>
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	Método Manométrico
Nitrogênio amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	Método Colorimétrico de Nessler
Nitrogênio na forma de nitrito (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Método Colorimétrico de Alfanaftilamina
Nitrogênio na forma de nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Método Colorimétrico de Brucina
Ortofostato (PO <sub>4</sub> )	Método Colorimétrico de Molibdênio

Fonte: APHA/AWWA/WEF (2005).

## 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.2.1 Primeira etapa – Pré-teste

O experimento foi finalizado no 15º dia de cultivo, quando as algas atingiram a fase estacionária de crescimento. Durante esse período, a temperatura medida nos cultivos variou entre 18,3 e 28,6°C. O pH apresentou queda no meio 50/50 (de 7,57 para 7,19) e no meio BF (7,72 a 7,29). No meio f/2 houve pequena oscilação do pH durante o cultivo, mas este se manteve praticamente estável em 7,5. A salinidade apresentou valores iniciais diferentes para cada cultivo: 34,96 g/L no meio f/2, 31,38 g/L no meio 50/50 e 27,63 g/l no meio BF. Nas três situações, houve acréscimo de 2 g/L, em média, nos valores finais de salinidade, devido principalmente à evaporação da água contida nos frascos ao longo do experimento.

Em relação à densidade celular, o meio BF apresentou as maiores taxas de crescimento, de um inóculo inicial de aproximadamente 2.200 células/mL até 9.300 células/mL ao fim do cultivo. O meio 50/50 apresentou crescimento um pouco inferior atingindo densidade celular final de 8.300 células/mL e o meio f/2 foi o que apresentou o menor crescimento, atingindo aproximadamente 7.000 células/mL ao fim do cultivo (Figura 5).

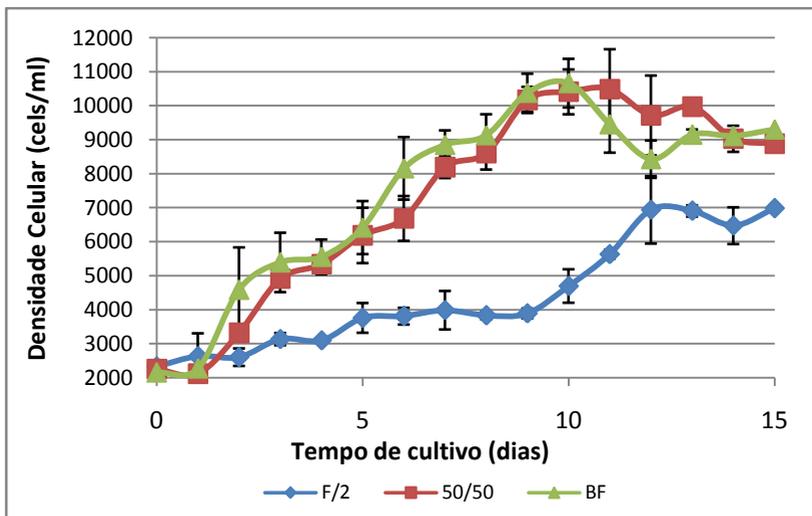


Figura 5: Densidade celular de microalgas ao longo do pré-teste.

A realização do pré-teste permitiu determinar a viabilidade do cultivo das microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata* utilizando o efluente do cultivo superintensivo de camarões, uma vez que em relação à densidade celular o crescimento das algas nos meios 50/50 e BF foi superior (18,6 e 32,8%, respectivamente) ao obtido em f/2. Dessa forma, foi possível proceder para a realização da segunda parte do experimento, onde as algas foram cultivadas com maior volume de meio de cultura, a fim de se obter uma maior quantidade de biomassa.

### 3.2.2 Segunda etapa

#### 3.2.2.1 Peso seco da biomassa e produtividade.

O experimento foi desenvolvido a partir de uma concentração inicial de biomassa de 0,1 g/L. Ao fim dos 12 dias de cultivo, foi possível observar um maior ganho de biomassa no meio BF que apresentou concentração final de 0,4 g/L, e um ganho menor nos meios f/2 e 50/50, apresentado, ambos, a concentração final de biomassa de 0,33 g/L (Figura 6).

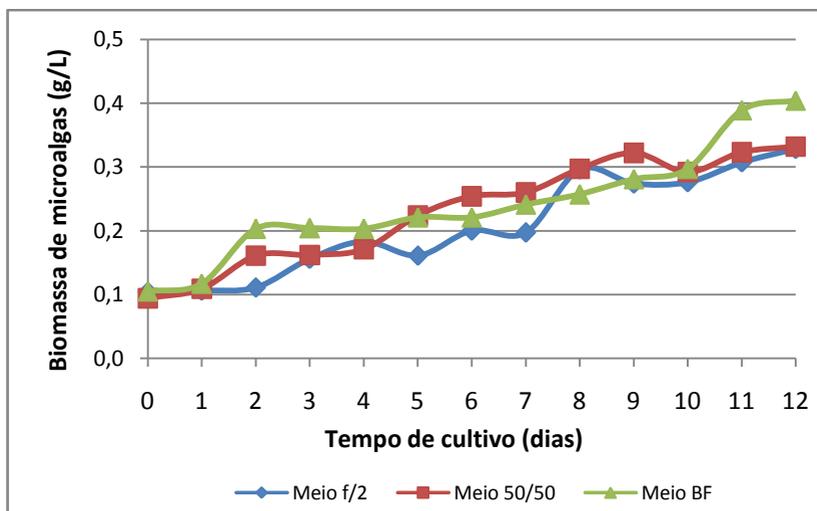


Figura 6: Biomassa de microalgas ao longo do cultivo

Os cultivos realizados nesse estudo apresentaram concentrações máximas de biomassa de 0,4 g/L, quando foi utilizado o meio com efluentes do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos. Porém, esse valor é menor do que aqueles descritos na literatura que, para a espécie *Nannochloropsis oculata*, variam de 0,5 a 1,0 g/L (RICHMOND, 2004).

O meio BF, que utiliza efluentes de bioflocos, apresentou a maior produtividade volumétrica média (0,03 g/L/d) e a maior produtividade média por área (5,0 g/m<sup>2</sup>/d). Por sua vez, os meios f/2 e 50/50 apresentaram produtividade volumétrica média 33,3% menor (0,02

g/L/d) e produtividade média por área 24,4% menor (3,83 g/m<sup>2</sup>/d), conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Produtividade média das culturas nos diferentes meios de cultivo.

Meios de Cultivo	Bi <sup>1</sup> (g/L)	Bmax <sup>2</sup> (g/L)	Bac <sup>3</sup> (g/L)	Tempo <sup>4</sup> (dias)	Prod vol <sup>5</sup> (g/L/d)	Prod área <sup>6</sup> (g/m <sup>2</sup> /d)	Prod área <sup>7</sup> (t/ha/a)
<b>f/2</b>	0,10	0,33	0,23	12	0,02	3,83	13,99
<b>50/50</b>	0,10	0,33	0,23	12	0,02	3,83	13,99
<b>BF</b>	0,10	0,40	0,30	12	0,03	5,00	18,25

1 – Biomassa; 2 – Biomassa máxima alcançada; 3 – Biomassa acumulada (Bmax – Bi); 4 – Tempo no qual foi alcançada a Bmax; 5 – Produtividade volumétrica (Bac/tempo); 6 – Produtividade por área em m<sup>2</sup>/dia (produtividade volumétrica x 200 = 200 L/m<sup>2</sup>); 7 – Produtividade por área em hectares/ano (produtividade por área em m<sup>2</sup>/dia x 365 dias).

Por meio da Tabela 3, é possível constatar que todos os cultivos desse trabalho obtiveram baixa produtividade volumétrica e também baixa produtividade por área. Enquanto a produtividade volumétrica máxima obtida nesse estudo foi 0,03 g/L/d, encontram-se registros de produtividades variando entre 0,025 até 0,125 g/L/d (FULKS; MAIN, 1991). Em situação semelhante a desse trabalho, cultivando a mesma espécie em cilindros de fibra de vidro, James e Al-Khars (1990) obtiveram produtividade volumétrica média de 0,05 g/L/d.

Tais constatações estão associadas ao fato de que, no presente estudo, não foram utilizados iluminação artificial e controle da temperatura nos cultivos. Dessa forma, as algas estavam sujeitas ao fotoperíodo natural de iluminação e às oscilações da temperatura do ambiente, o que pode ter diminuído a produtividade e a concentração de biomassa dos cultivos.

Quando comparamos o presente estudo com cultivos que também utilizam iluminação natural, ainda obtemos produtividade por área muito inferior a outros trabalhos. Nesses cultivos, foi observada produtividade superior a 10 g/m<sup>2</sup>/d (RICHMOND, 2004). Porém, é importante ressaltar que aqueles estudos foram desenvolvidos em estruturas apropriadas para o cultivo das microalgas, tanto em lagoas abertas quanto em fotobiorreatores, que são desenvolvidos com o objetivo de aumentar a superfície iluminada dos cultivos, otimizando as

taxas de fotossíntese e o crescimento dos mesmos. Os cilindros de fibra de vidro utilizados nesse estudo são mais apropriados para cultivos que se utilizam de iluminação artificial.

### 3.2.2.2 Teor de lipídios totais e ésteres.

As análises de teor de lipídios totais na biomassa apresentaram valores médios semelhantes para os três meios de cultivo. O meio 50/50 obteve a maior média de acumulação de lipídios: 15,36%, o meio f/2 obteve 14,93% e o meio BF 12,99% de lipídios (Tabela 4).

Tabela 4: Teor de lipídios nos diferentes Meios de cultivo

<b>Meios de Cultivo</b>	<b>Rendimento</b>
<b>Meio f/2</b>	Amostra 1 – 13,85 %
	Amostra 2 – 14,86 %
	Amostra 3 – 16,08 %
<b>Meio 50/50</b>	Amostra 1 – 15,86 %
	Amostra 2 – 16,40 %
	Amostra 3 – 13,83 %
<b>Meio BF</b>	Amostra 1 – 13,41 %
	Amostra 2 – 13,14 %
	Amostra 3 – 12,43 %

Vários requisitos são importantes para avaliar se determinada matéria prima pode ser utilizada para a produção de biodiesel. Para microalgas, avalia-se o rendimento da transesterificação direta, na forma do teor de ésteres que compõem as amostras. As amostras de biomassa do meio 50/50 apresentaram os maiores teores de ésteres (94,6 miligramas de ésteres por grama de biomassa). O meio f/2 apresentou teor de 90 miligramas de ésteres por grama de biomassa. E, no meio de cultivo BF foi encontrada a menor acumulação desse material, 88,8 miligramas de ésteres por grama de biomassa.

Levando em consideração a quantidade de ésteres, em relação aos lipídios totais, e a produtividade de biomassa por área, é possível perceber que embora haja uma menor acumulação de lipídios e ésteres

nas microalgas do meio BF, a produtividade de ésteres por área ainda é maior (1,62 t/ha/ano) do que a encontrada nos meios f/2 (1,26 t/ha/ano) e 50/50 (1,32 t/ha/ano). Esse dado está associado diretamente com a maior produtividade de biomassa por área encontrada no meio BF, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Produtividade por área dos cultivos em relação a lipídios totais e ao teor de ésteres.

Meios de cultivo	Prod Área (t/ha/a)	Lípidios Totais (% média)	Ésteres (% média)	Prod Lípidios por Área (t/ha/ano)	Prod Ésteres por Área (t/ha/ano)
<b>f/2</b>	13,99	14,93	9,00	2,09	1,26
<b>50/50</b>	13,99	15,36	9,46	2,15	1,32
<b>BF</b>	18,25	12,99	8,88	2,37	1,62

Em relação ao teor de lipídios e ésteres na biomassa, o valor máximo obtido nesse estudo foi de 15,36% no meio de cultivo 50/50. Em seu estudo, Chisti (2007) afirma que, para espécies do gênero *Nannochloropsis sp.*, a porcentagem de lipídios acumulados na biomassa pode variar de 31 a 68%, dependendo do tipo de cultivo empregado. Percebe-se que são necessários aprimoramentos nos cultivos no que se refere à produtividade por área, tais como a adequação das estruturas de cultivo, a fim de que eles tornem-se viáveis para a produção comercial de biodiesel.

### 3.2.2.3 Consumo de nutrientes.

Após o período de 12 dias, foi possível observar nos três cultivos uma redução significativa nas concentrações de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), ortofosfato ( $\text{PO}_4$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) dos meios de cultivo. As taxas de DBO demonstraram grande variação, apresentando acréscimo no meio 50/50 e decréscimo nos meios de cultivo f/2 e BF. As concentrações de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) apresentaram valores reduzidos e em algumas amostras não foram detectadas, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros químicos iniciais e finais dos meios de cultivo de *N. oculata*

Parâmetros	f/2		50/50		BF	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
DBO (mg/l)	7,7	3,2	7,4	10,0	7,1	4,0
N-NH <sub>3</sub> (mg/l)	1,6	1,2	1,9	1,5	2,3	1,5
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0,01	ND*	ND*	ND*	0,04	ND*
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	12,5	0,1	11,1	5,2	15,3	11,9
PO <sub>4</sub> (mg/l)	12,5	0,1	14,5	1,2	16,6	1,0

\*ND – Não detectado

A DBO foi reduzida nos meios de cultivo F/2 e BF a em 58% e 43%, respectivamente. A menor taxa de DBO foi obtida no meio f/2 final, apresentando 3,2 mg/L. Por sua vez, o meio 50/50 apresentou acréscimo de 26% na DBO após o cultivo das algas (

Figura 7).

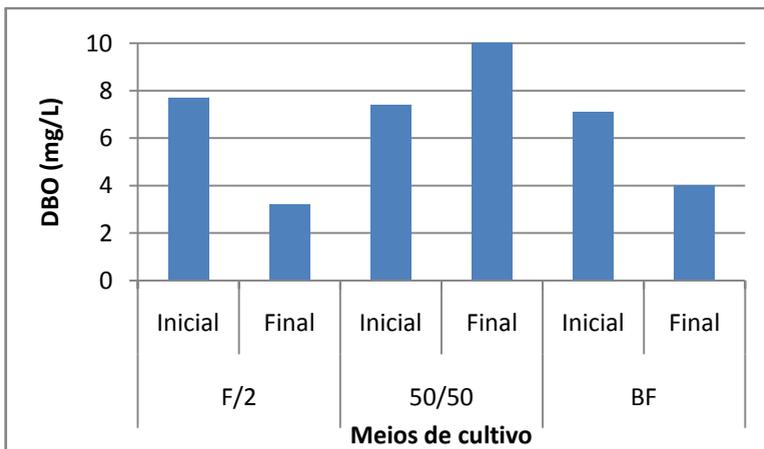


Figura 7: DBO nos cultivos de microalgas.

Com relação à concentração de amônia nos cultivos, houve redução da sua concentração nos três cultivos: 26% em f/2, 22,7% em

50/50 e 35,6% em BF. O meio f/2 foi o que apresentou as menores concentrações tanto inicial, quanto final (Figura 8).

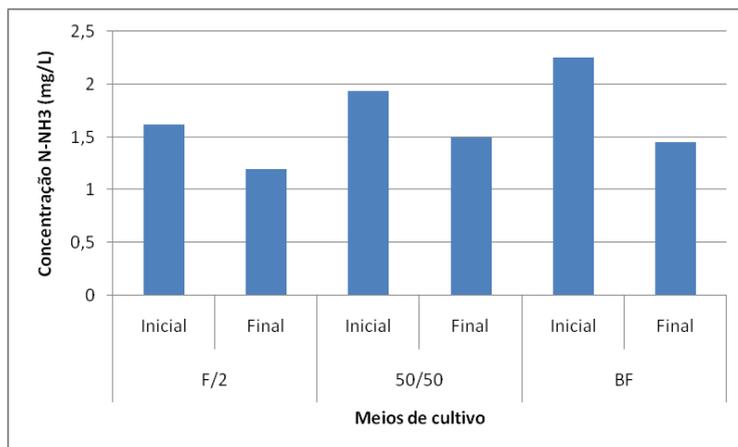


Figura 8: Nitrogênio amoniacal nos cultivos de microalgas.

No que se refere à concentração de nitrato, é possível perceber que houve um consumo quase total do nitrato dissolvido no meio f/2 (99% de redução da concentração). Por outro lado, os meios 50/50 e BF apresentaram maiores valores finais de concentração desse nutriente, resultando em redução do nitrato consumido (53,7 e 22,7%, respectivamente), conforme demonstrado na Figura 9. As maiores concentrações desse nutriente foram obtidas no meio BF (15,32 mg/L inicial e 11,85 mg/L final).

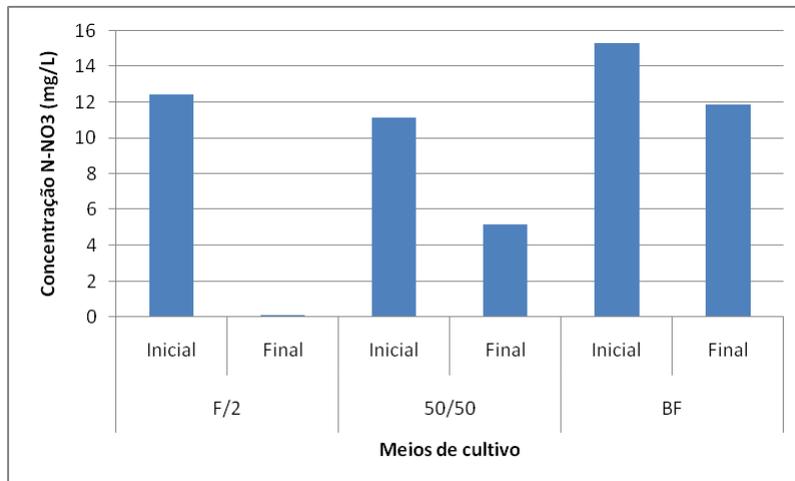


Figura 9: Nitrato nos cultivos de microalgas.

As concentrações de ortofosfato apresentaram a redução mais significativa nos três meios de cultivo, sendo quase totalmente consumido em todos (Figura 10). A redução na concentração foi de 99,2% em f/2, 91,7% em 50/50 e 94% em BF. A maior concentração final foi verificada em BF (16,6 mg/l) e a menor concentração final em f/2 (0,1mg/l).

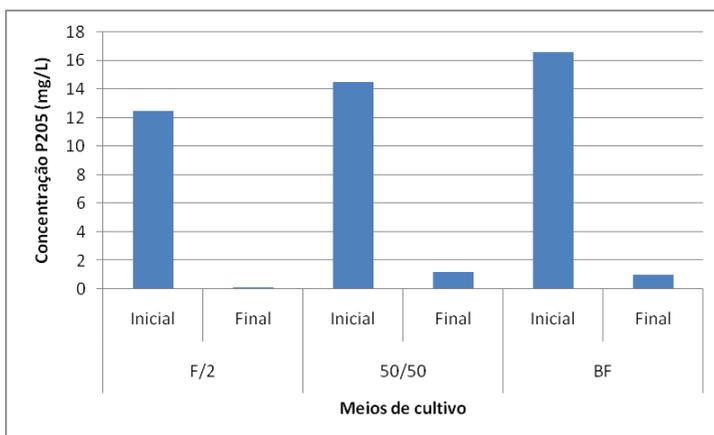


Figura 10: Ortofosfato nos cultivos de microalgas.

Observando as curvas de crescimento dos cultivos, é possível inferir que, aparentemente, as microalgas dos cultivos 50/50 e BF ainda encontravam-se em fase exponencial de crescimento quando o experimento foi encerrado. Esse fato pode ainda ser corroborado pela observação dos parâmetros químicos do cultivo, onde pode ser constatado que ainda havia disponibilidade de nutrientes nesses meios ao fim do experimento, especialmente nitrato e fosfato. Caso o crescimento das microalgas tivesse sido prolongado por mais algum tempo, há a possibilidade de que poderiam ser geradas maiores produtividades nesses cultivos. Quanto ao meio f/2, é possível inferir que a sua produtividade foi menor em relação aos demais porque todo o fosfato disponível foi assimilado e, sendo assim, esse nutriente pode ter limitado a produção de biomassa.

No que se refere à remoção de nutrientes do meio de cultivo, as microalgas cultivadas em meio f/2 apresentaram a maior eficiência de remoção para todos os parâmetros analisados, exceto amônia, no qual o meio BF foi o mais eficiente. Foi possível perceber que o cultivo de microalgas pode representar um potencial depurador de nutrientes do efluente do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos, com uma taxa de remoção variando entre 25 a 50%, dependendo do parâmetro analisado.

O estudo de Chisti (2007) afirma que a disponibilidade de fosfato no meio é um dos principais fatores limitantes do crescimento dessas algas. No presente estudo, o fosfato foi quase totalmente consumido em todos os cultivos e a presença de uma pequena quantidade de fosfato em 50/50 e BF pode indicar que as algas ainda não haviam atingido a fase estacionária de crescimento.

Com relação aos demais parâmetros, a literatura afirma que a remoção na concentração de nutrientes dissolvidos nos cultivos de microalgas, utilizando águas residuárias, é de aproximadamente 80% (McGINN et al., 2011). O presente estudo obteve valores de remoção semelhantes em f/2 e menor em 50/50 e BF. Porém, é importante salientar que as condições de realização dos cultivos desse estudo foram diferentes daquelas descritas na literatura, especialmente no que se refere à iluminação. Isso pode ter contribuído para a redução do crescimento das microalgas e da remoção dos nutrientes dissolvidos no meio de cultivo.

### 3.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através desse estudo, foi possível constatar que as microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata* apresentam potencial para utilização em cultivos que utilizam o efluente de cultivo superintensivo de camarões com bioflocos como meio de cultura. No que se refere a ganho de biomassa, as algas apresentaram crescimento superior em BF, em comparação ao meio de cultivo tradicional f/2, que utiliza fertilizantes químicos. A opção de combinar esses dois meios de cultivo, utilizando 50% de cada um deles na composição final, representou um crescimento e ganho de biomassa semelhante ao obtido no cultivo com efluente.

Porém, a produtividade, em relação ao teor de lipídios e ésteres encontrados nesses cultivos, indica que esse formato de cultivo em larga escala é, provavelmente, inviável para a produção de biodiesel sob esse aspecto. Dessa forma, são necessárias adequações no processo produtivo das microalgas, a fim de aumentar a produtividade por área e aumentar a acumulação de ésteres nas células microalgais como, por exemplo, aumento da superfície de iluminação das culturas.

Esse trabalho permitiu, também, observar que essas microalgas podem ser utilizadas no tratamento dos efluentes do cultivo superintensivo de camarões. As concentrações de fosfato, nitrato, nitrito e amônia e DBO presentes no meio foram reduzidas após a utilização desse efluente como meio de cultivo para as microalgas. Maiores estudos são necessários para avaliar outros parâmetros físicos e químicos do efluente e a remoção dos nutrientes através do cultivo de microalgas.

As análises químicas demonstraram que ainda restaram muitos nutrientes dissolvidos ao fim do cultivo utilizando efluente, especialmente nitrato. Dessa forma, fazem-se necessários novos estudos para avaliar a utilização desse efluente em um novo processo para reduzir as concentrações dos nutrientes. Algumas alternativas podem ser propostas, tais como: aumento do período de cultivo das microalgas, um novo cultivo de algas nesse efluente, ou ainda o reaproveitamento desse efluente na carcinocultura, no cultivo superintensivo de camarões. Porém, essas possibilidades necessitam de avaliação de viabilidade e testes práticos de cultivo.

## **4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CULTIVO DE MICROALGAS**

Este capítulo trata da avaliação ambiental comparativa entre o processo convencional de produção de microalgas, utilizando fertilizantes, e o processo utilizando efluentes do cultivo super intensivo de camarões marinhos em bioflocos, mensurando os impactos relativos dessa substituição através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

### **4.1 MÉTODO**

Esse estudo foi realizado conforme os procedimentos descritos nas normas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) NBR ISO 14.040 e NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009a e 2009b). Dessa forma, está dividido em 4 etapas: definição do escopo, análise de inventário, avaliação de impacto de ciclo de vida e interpretação.

#### **4.1.1 Escopo do estudo**

O sistema desse estudo envolve a produção de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata* em lagoas abertas, utilizando diferentes fontes de nutrientes para o meio de cultivo, envolvendo desde a aquisição e a produção de matérias-primas, o transporte, o cultivo das microalgas, a geração de emissões e os demais fluxos intermediários envolvidos no processo produtivo.

As microalgas, como apontado por Lourenço (2006) e Antoni et al. (2007), possuem diversas aplicações, sendo que, para esta ACV, definiu-se que a função da microalga é fornecer biomassa para obtenção de compostos de interesse comercial, especialmente lipídios para a produção de biodiesel. A unidade funcional estabelecida foi a produção de 1 kg de biomassa de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata*, contendo uma porcentagem média de conteúdo lipídico de 25% em um período de 30 dias. A unidade funcional foi estabelecida dessa forma para que os resultados não sofressem possíveis alterações, em função da

variação do acúmulo de lipídios em cada um dos cenários, e para delimitar o período máximo de tempo necessário para a produção dessa biomassa.

As fronteiras do sistema, para todos os cenários em análise, envolvem desde os processos elementares de cultura das cepas para a preparação do inóculo, até a as algas prontas para a secagem e extração dos biocompostos. Serão considerados a produção e o transporte das matérias-primas utilizadas no cultivo, bem como a geração de efluentes e resíduos deste mesmo processo. As emissões gasosas, os processos de extração dos lipídios e a produção do biodiesel não foram considerados nesse estudo. O fluxograma dos sistemas estudados está representado na Figura 11.

Foram comparados três cenários de fonte de nutrientes para o cultivo massivo: no cenário **f/2** o meio de cultivo considerado foi o meio f/2 de Guillard, composto por água salgada e fertilizantes; no cenário **50/50** foi considerada a utilização de 50% de meio F/2 e 50% de fração líquida de efluente; por sua vez, no cenário **BF** foi considerado somente o efluente de cultivo superintensivo de camarões com bioflocos como meio de cultivo.

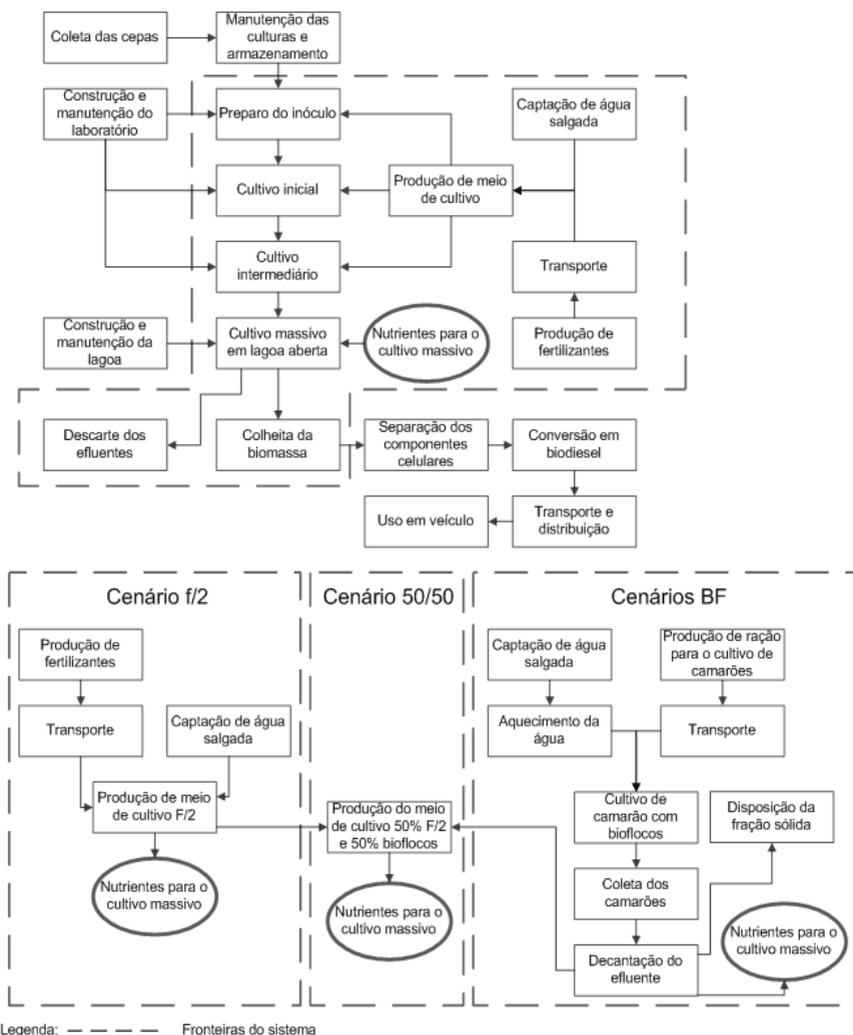


Figura 11: Fluxograma dos processos elementares de produção de microalgas.

Em situações na qual um determinado processo produtivo gera simultaneamente e indissociadamente mais de um produto, faz-se necessária a realização do procedimento de alocação, conforme descrito na norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a). Esse mecanismo distribui os fluxos de energia e massa do processo e, conseqüentemente, os impactos ambientais gerados, proporcionalmente para os produtos.

No presente estudo, foi considerado que há a geração de dois produtos no processo “Cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos”: camarões e efluente, sendo o segundo utilizado posteriormente como matéria-prima para a produção de microalgas nos cenários 50/50 e BF. A fim de avaliar a influência dos procedimentos de alocação adotados nos resultados, foram estabelecidos dois subcenários para BF utilizando métodos de alocação diferentes.

No cenário denominado **BFa**, considerou-se que o efluente é um subproduto do processo de produção de camarões e, sendo assim, possui valor econômico agregado a ele. Dessa forma, foi adotado o procedimento de alocação econômica, que distribui os impactos de acordo com o custo de produção de cada um dos produtos gerados (EKVALL; FINNVEDEN, 2001). Para o cálculo da alocação adotada nesse cenário, foram utilizadas como referência as seguintes considerações:

- A produção de 1 kg de camarão em cultivo superintensivo com bioflocos gera 620 L de efluentes (MAGNOTTI, 2011).
- O valor de venda de 1 kg de camarão é de R\$ 9,00 em média.
- O custo de produção de 620 litros de meio de cultivo f/2 para microalgas é de R\$ 0,49/L em média.
- Foi admitido que o valor econômico máximo que pode ser atribuído ao efluente seria equivalente ao custo de produção utilizando meio f/2.

Utilizando esses dados foi possível calcular o valor total dos dois produtos somados, que é de R\$ 9,49. Com base nesse dado e no valor individual de cada um dos produtos (camarão R\$ 9,00 e efluente R\$ 0,49), atribuíram-se os impactos ambientais proporcionalmente para cada um dos produtos. Dessa forma, são atribuídos para a produção de camarão 94,8% dos impactos ambientais gerados por esse processo e para o efluente são atribuídos 5,2% dos impactos.

O outro cenário, denominado **BFb**, considera que o efluente de bioflocos gerado nesse processo não é um subproduto, e sim, um resíduo que não possui valor econômico, atribuindo todos os impactos ambientais para o processo de produção de camarão. Porém, esse resíduo gerado é reaproveitado no processo de cultivo de microalgas, configurando-se, assim, uma reciclagem de produto em ciclo aberto. Segundo Ekvall e Finnveden (2001), a reciclagem de ciclo aberto ocorre quando um produto ou um material de um ciclo de vida são usados

dentro de outro sistema de produto, excedendo os limites daquele sistema em estudo.

Dessa forma, o procedimento de alocação adotado nesse cenário será o de Tratamento Final Evitado (FRISCHKNECHT, 2007), no qual os impactos ambientais evitados, referentes à produção primária (produção de fertilizantes e tratamento do efluente do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos), serão creditados ao produto que enviam para reciclagem (microalgas produzidas a partir do efluente).

As equações para alocação por Tratamento Final Evitado adotadas foram as descritas por Ramírez (2009) e podem ser visualizadas abaixo:

$$\begin{aligned}L_1 &= 0 \\L_2 &= W_2 + W_3\end{aligned}$$

Onde:

$L_1$  – Impacto positivo creditado para o produto 1 (microalgas produzidas utilizando fertilizantes).

$L_2$  – Impacto positivo creditado para o produto 2 (microalgas produzidas utilizando efluente de cultivo superintensivo de camarões com bioflocos).

$W_2$  – Fator de impacto do processo de tratamento dos efluentes do cultivo superintensivo de camarões com bioflocos.

$W_3$  – Fator de impacto do processo de produção de fertilizantes.

Para avaliação do fator  $W_2$ , considerou-se uma situação similar à observada *in loco* no Laboratório de Camarões Marinhos da UFSC. Foi assumido que o tratamento dos efluentes do cultivo superintensivo de camarões é realizado em uma lagoa aerada facultativa, com as dimensões de 15 m x 15 m x 2 m. A vazão dessa lagoa é equivalente a 24 tanques de 40 m<sup>3</sup> em período de 60 dias, o que resulta em uma vazão média de 19 m<sup>3</sup>/dia. De posse do volume da lagoa e da vazão, calculou-se o tempo de detenção e foi considerada uma eficiência de 30% de remoção de nutrientes (VON SPERLING, 2001). A partir desses dados, foi calculado o requerimento de oxigênio e a eficiência de aeração da lagoa e, posteriormente, foi calculada a potência requerida para a realização do tratamento desses efluentes: 1,6 kWh. Relativizando esse valor para a unidade funcional, temos 0,0017 Wh de energia para cada 2 m<sup>3</sup> de efluente.

Além disso, também fazem parte do fator de impacto do processo de tratamento dos efluentes os nutrientes que tiveram sua emissão evitada, em função da sua reutilização no processo produtivo das microalgas, e seriam responsáveis por impactos ambientais de eutrofização (por exemplo, nitrato, fosfato e amônia). Uma vez que a eficiência considerada foi de 30%, admitiu-se que os 70% das emissões que seriam lançadas foram evitadas, subtraindo desse total os valores de emissões obtidos após o cultivo das microalgas. Todos os valores de emissões seguem as análises realizadas no capítulo 3.

É importante ressaltar que o cenário 50/50, que utiliza 50% de efluentes do cultivo superintensivo de camarões como matéria prima, utiliza os dados do efluente de acordo com o procedimento de alocação econômica, descrito no cenário BFa.

#### **4.1.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida**

O sistema em estudo está localizado em Florianópolis, Santa Catarina, região Sul do Brasil. Os dados referentes ao cultivo de microalgas e camarões foram todos coletados no Laboratório de Cultivo de Algas e no Laboratório de Camarões Marinhos, respectivamente, pertencentes à Universidade Federal de Santa Catarina. Os dados foram obtidos por meio de visitas aos laboratórios e coleta de informações com os técnicos responsáveis pelos cultivos.

Os dados referentes à produtividade dos cultivos de microalgas, consumo de nutrientes e composição dos efluentes gerados no processo seguem os dados primários descritos no capítulo 3. A composição da ração utilizada no cultivo superintensivo de camarões com bioflocos está de acordo com Scopel et al. (2011).

Os dados de produção de fertilizantes, produção e manutenção de equipamentos utilizados no cultivo e produção de energia elétrica foram extraídos do banco de dados *Ecoinvent* 2.2 (ECOINVENT, 2010). Como fonte de energia elétrica foi utilizada a matriz energética brasileira.

Os processos produtivos, delimitados pelo sistema desse estudo, iniciam-se com a cultura de cepas com volume de 500 mL da alga *Nannochloropsis oculata* em frascos de borossilicato em ambiente controlado e com iluminação artificial e aeração constante para a preparação do inóculo. Ele será utilizado como semente para o cultivo

inicial, que consiste em dobrar o volume de cultura a cada 3 dias, acrescentando água salgada em meio ao cultivo até que se atinja um volume de 10 litros, totalizando 12 dias.

Em seguida, essa cultura é transferida para o cultivo intermediário, que consiste em um tanque de fibra de vidro, no qual são colocados a cultura e o meio de cultivo progressivamente até que se atingissem 400 litros de cultura, em período aproximado de 12 dias. Durante esses 24 dias, as culturas receberam aeração constante provida por um compressor de ar. Tanto no cultivo inicial quanto no intermediário, o meio de cultura utilizado para o crescimento das algas foi o meio f/2 de Guillard (GUILLARD, 1975), composto basicamente por água salgada e fertilizantes ricos em nitrogênio, fósforo, traços de metais e vitaminas, conforme a Tabela 1.

Posteriormente, a cultura é bombeada para o cultivo massivo, que corresponde a uma lagoa aberta em formato de tanque raso tipo *raceway* (0,18 m de profundidade por 1,115 m de comprimento), forrado com lona vinílica. O cultivo massivo de algas é revolvido por um aerador de pás que mantém a taxa de fluxo entre 0,10 e 0,25 m/s para assegurar a mistura correta do meio com as células algais e permitir a aeração do cultivo. Como fonte de nutrientes, pode ser utilizado o mesmo meio f/2 dos cultivos iniciais e intermediários (Cenário f/2) ou o efluente, proveniente do cultivo superintensivo de camarões (Cenários BF), ou ainda uma mistura utilizando os dois meios em iguais proporções (Cenário 50/50).

As microalgas permanecem no cultivo massivo por 9 dias, até atingirem a fase estacionária de crescimento. Foi considerado que a concentração de algas pode atingir até 0,5 g/L de cultivo, resultando em 10000 L de volume final de cultivo, suficiente para a produção de 5 kg de biomassa. Após esse período, a biomassa é centrifugada gerando uma pasta de microalgas que é encaminhada para secagem e o efluente, encaminhado para tratamento. A composição desse efluente em cada um dos cenários segue os resultados obtidos no capítulo três.

Para a obtenção dos dados sobre os efluentes, foi necessário considerar também no sistema o processo de produção superintensiva de camarões. Esse processo se inicia a partir da produção e obtenção dos nutrientes para o cultivo, descritos na

Tabela 7. A composição da ração segue Scopel et al. (2011) e os demais nutrientes estão de acordo com Magnotti (2011).

Os nutrientes e a água salgada são bombeados para tanques de fibra de carbono com capacidade para 50.000 L de cultivo com aeração

constante, produzida por um aerador de pá. A temperatura do cultivo é mantida em 30°C com o auxílio de um trocador de calor, operando de acordo com a necessidade de aquecimento da água. Nesses tanques, são colocadas também as larvas de camarão, que ali permanecem por 60 dias, período no qual atingem a maturação. Ao fim do cultivo, o efluente gerado sofre processo de decantação, sendo a fração sólida encaminhada para tratamento de resíduos e a fração líquida bombeada para a lagoa de produção de microalgas. Foi considerado que os camarões assimilam 25% dos nutrientes presentes na ração (BURFORD et al., 2003), estando o restante diluído no efluente gerado.

Tabela 7: Insumos utilizados no cultivo superintensivo de camarão com bioflocos.

<b>Insumos</b>	<b>Quantidade</b>
Água salgada	26,00 m <sup>3</sup>
Água doce	22,00 m <sup>3</sup>
Melaço de cana em pó 69%	38,30 kg
Farelo de arroz tipo amarelo peneirado	60,00 kg
Cal hidratada	6,70 kg
Ração	94,10 kg
<i>Farelo de soja</i>	35,56 kg
<i>Carne 43%</i>	13,71 kg
<i>Farelo de trigo</i>	9,14 kg
<i>Farelo de arroz</i>	4,57 kg
<i>Levedura de cana</i>	9,14 kg
<i>Quirera de arroz</i>	3,29 kg
<i>Farinha de vísceras</i>	2,83 kg
<i>Lecitina de soja</i>	2,38 kg
<i>Penas hidrolisadas</i>	2,29 kg
<i>Gordura de peixe</i>	1,37 kg
<i>Fosfato monobásico</i>	1,31 kg
<i>Sal refinado</i>	0,46 kg
<i>Suplementação vitamínica</i>	1,74 kg

Fonte: Magnotti (2011) e Scopel et al., (2011).

O processo de captação da água salgada consiste em uma bomba hidráulica posicionada a 60 m do mar que capta água por meio de uma

ponteira produzida com tubos de PVC, e bombeia a água captada por 2,5 km de dutos de PVC até uma cisterna, onde a água é armazenada. Posteriormente, essa água é bombeada para os cultivos de microalgas e de camarões.

Devido à falta de dados primários, não foram consideradas no sistema em estudo as etapas de extração dos lipídios e conversão em biodiesel. Também não foram incluídas a construção e a manutenção do laboratório e das lagoas de produção das microalgas e dos camarões e a produção e utilização dos equipamentos utilizados no sistema, tais como lâmpadas, tubos de PVC, bombas hidráulicas, compressores de ar, aeradores de pá e caldeiras. No caso dos equipamentos elétricos, foi considerado apenas o consumo energético desses produtos durante o processo produtivo, em função da unidade funcional.

Com relação aos transportes, foi estabelecida uma distância de 150 quilômetros entre os produtores de fertilizantes e ração para o local do sistema em estudo. Não foi considerada a distância entre o cultivo de microalgas e camarões, pois se admitiu que os dois sistemas produtivos são integrados, necessitando apenas de bombeamento de um tanque para o outro.

### **4.1.3 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida**

Os dados foram compilados e os resultados obtidos, a partir da utilização do software *SimaPro 7.3*. No presente estudo, o método de avaliação de impacto escolhido foi o *CML baseline 2000*, desenvolvido na Holanda pelo *Center of Environmental Science of Leiden University*, pois é o mais utilizado nos estudos de ACV de microalgas, o que facilita a comparação dos resultados. Esse método apresenta diversas categorias de impacto ambiental, convertendo os dados de fluxos de matéria e energia em unidades de medidas específicas, de acordo com a unidade funcional proposta pelo estudo (GUINEÉ, 2002). Desse método, foram selecionadas cinco categorias de impacto: acidificação, eutrofização, potencial de aquecimento global (GWP 100a) e toxicidade humana. Ainda foi acrescida a categoria Demanda de energia total acumulada, desenvolvida pelo *Ecoinvent Centre*.

#### **4.1.4 Interpretação**

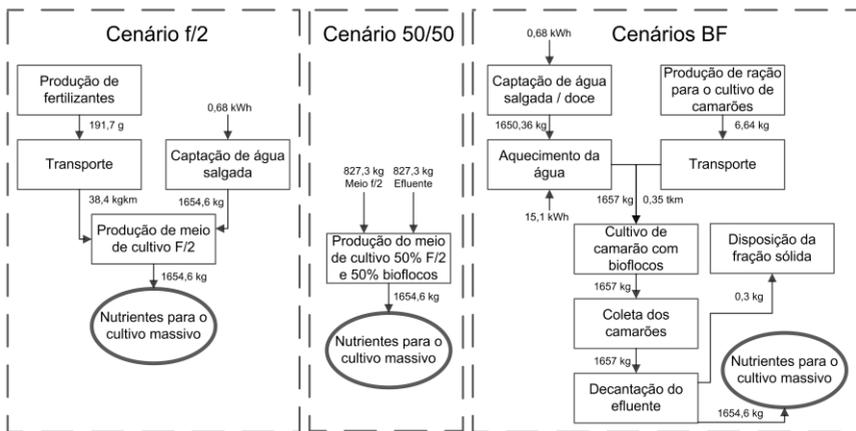
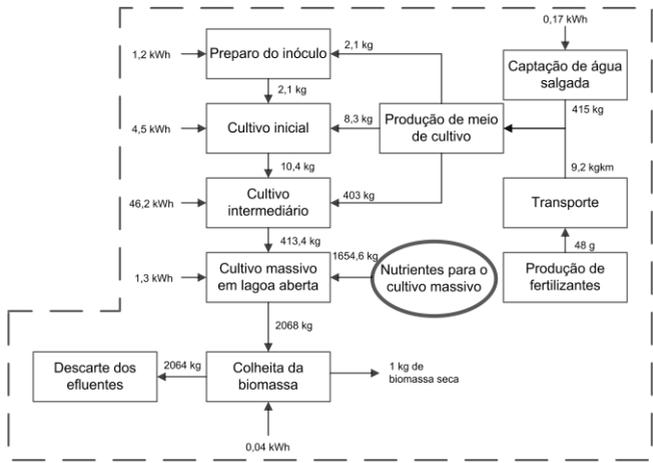
Os resultados obtidos nas etapas de Análise de Inventário e Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida estão apresentados no item 3.3 deste estudo e foram comparados com outros estudos de ACV de microalgas tais como Campbell et al. (2011), Collet et al. (2010) e Lardon et. al. (2009).

Para a comparação do inventário, foram utilizados trabalhos que apresentavam unidades funcionais semelhantes ou nos quais foi possível uma relativização com os dados desse estudo. Por sua vez, os resultados de avaliação de Impacto ambiental foram comparados com estudos que utilizaram métodos ou categorias de impacto semelhantes aos desse trabalho.

### **4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **4.2.1 Inventário do Ciclo de Vida**

O fluxograma resumido do Inventário do ciclo de vida (ICV) apontando os fluxos de entrada e saída de matéria e energia do sistema está apresentando na Figura 12. A lista completa de fluxos do sistema para os quatro cenários está apresentada nas Tabelas 8, 9 e 10. Os valores apresentados referem-se à unidade funcional proposta no item 4.1.1 e seguem os limites propostos nas fronteiras do sistema, da produção de insumos até as algas prontas para a extração da fração lipídica.



Legenda: - - - - - Fronteiras do sistema

Figura 12: Fluxograma dos processos elementares de produção de microalgas.

Tabela 8: ICV do cultivo de microalgas para os cenários f/2.

<b>ENTRADAS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Recursos da natureza</b>			
Água salgada	2010	L	Dado primário
<b>Insumos</b>			
Nitrato de sódio	195	g	Guillard (1975)
Cloreto de ferro hidratado	10,4	g	Guillard (1975)
Acido etilenodiamino tetra-acético	13	g	Guillard (1975)
Cloreto de zinco hidratado	0,0286	g	Guillard (1975)
Cloreto de cobalto hidratado	0,026	g	Guillard (1975)
Molibdeto de amônio hidratado	0,0104	g	Guillard (1975)
Sulfato de cobre hidratado	0,02548	g	Guillard (1975)
Cloreto de manganês hidratado	0,468	g	Guillard (1975)
Fosfato monobásico de sódio hidratado	20,8	g	Guillard (1975)
Tiamina (Vitamina B1)	0,26	g	Guillard (1975)
Biotina (Vitamina B7)	0,0013	g	Guillard (1975)
Cianocobalamina (Vitamina B12)	0,0013	g	Guillard (1975)
Hipoclorito de sódio	10	g	Guillard (1975)
<b>Energia e Transporte</b>			
Eletricidade (bombas hidráulicas)	1,02	kWh	Dado primário
Eletricidade (lâmpadas)	51,84	kWh	Dado primário
Eletricidade (aeradores)	1,24	kWh	Dado primário
Eletricidade (centrífuga)	0,042	kWh	Collet et al(2011)
Transporte de insumos	0,024	tkm	Dado primário
<b>SAÍDAS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Produto</b>			
Biomassa de microalgas	1	kg	Dado primário
<b>Emissões</b>			
Água	1998	L	Dado primário
Sais, não especificados	70	kg	Dado primário
DBO	6,4	g	Dado primário
Amônia	2,4	g	Dado primário
Nitrato	0,24	g	Dado primário
Pentóxido de fósforo	0,2	g	Dado primário

Tabela 9: ICV do cultivo de microalgas para o cenário 50/50.

<b>ENTRADAS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Recursos da natureza</b>			
Água salgada	1447,5	L	Magnotti (2011)
Água doce, retirada de uma lagoa	482,5	L	Magnotti (2011)
<b>Insumos</b>			
Nitrato de sódio	105,3	g	Guillard (1975)
Cloreto de ferro hidratado	5,616	g	Guillard (1975)
Acido etilenodiamino tetra-acético	7,02	g	Guillard (1975)
Cloreto de zinco hidratado	0,0155	g	Guillard (1975)
Cloreto de cobalto hidratado	0,039	g	Guillard (1975)
Molibdeto de amônio hidratado	0,0063	g	Guillard (1975)
Sulfato de cobre hidratado	0,0137	g	Guillard (1975)
Cloreto de manganês hidratado	0,253	g	Guillard (1975)
Fosfato monobásico de sódio hidratado	11,232	g	Guillard (1975)
Tiamina (Vitamina B1)	0,141	g	Guillard (1975)
Biotina (Vitamina B7)	0,00075	g	Guillard (1975)
Cianocobalamina (Vitamina B12)	0,0075	g	Guillard (1975)
Melaço de cana em pó 69%	0,8	kg	Magnotti (2011)
Farelo de arroz tipo amarelo peneirado	1,25	kg	Magnotti (2011)
Cal hidratada	0,14	kg	Magnotti (2011)
Ração para camarão	1,97	kg	Magnotti (2011)
Hipoclorito de sódio	7,5	g	Guillard (1975)
<b>Energia e transporte</b>			
Eletricidade (bombas hidráulicas)	1,06	kWh	Dado primário
Eletricidade (lâmpadas)	51,84	kWh	Dado primário
Eletricidade (aeradores)	2,81	kWh	Dado primário
Eletricidade (trocador de calor)	9,38	kWh	Dado primário
Eletricidade (centrífuga)	0,042	kWh	Collet et al (2011)
Transporte de insumos	0,42	tkm	Dado primário
<b>SAÍDAS</b>			
<b>Produto</b>			
Biomassa de microalgas	1	kg	Dado primário
<b>Emissões</b>			
Água	1998	L	Dado primário
Sais, não especificados	66	kg	Dado primário
Amônia	3,0	g	Dado primário
Nitrato	10,3	g	Dado primário
Pentóxido de fósforo	2,4	g	Dado primário

Tabela 10: ICV do cultivo de microalgas para os cenários BFa e BFb.

<b>ENTRADAS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Recursos da natureza</b>			
Água salgada	1085	L	Magnotti (2011)
Água doce, retirada de uma lagoa	925	L	Magnotti (2011)
<b>Insumos</b>			
Nitrato de sódio	7,8	g	Guillard (1975)
Cloreto de ferro hidratado	0,416	g	Guillard (1975)
Acido etilenodiamino tetra-acético	0,52	g	Guillard (1975)
Cloreto de zinco hidratado	0,0012	g	Guillard (1975)
Cloreto de cobalto hidratado	0,026	g	Guillard (1975)
Molibdeto de amônio hidratado	0,0011	g	Guillard (1975)
Sulfato de cobre hidratado	0,0010	g	Guillard (1975)
Cloreto de manganês hidratado	0,019	g	Guillard (1975)
Fosfato monob. de sódio hidratado	0,832	g	Guillard (1975)
Tiamina (Vitamina B1)	0,011	g	Guillard (1975)
Biotina (Vitamina B7)	0,0001	g	Guillard (1975)
Cianocobalamina (Vitamina B12)	0,0001	g	Guillard (1975)
Melaço de cana em pó 69%	1,6	kg	Magnotti (2011)
Farelo de arroz amarelo peneirado	2,5	kg	Magnotti (2011)
Cal hidratada	0,28	kg	Magnotti (2011)
Ração para camarão	3,93	kg	Magnotti (2011)
Hipoclorito de sódio	5	g	Guillard (1975)
<b>Energia e transporte</b>			
Eletricidade (bombas hidráulicas)	1,11	kWh	Dado primário
Eletricidade (lâmpadas)	51,84	kWh	Dado primário
Eletricidade (aeradores)	2,72	kWh	Dado primário
Eletricidade (trocador de calor)	18,75	kWh	Dado primário
Eletricidade (centrífuga)	0,042	kWh	Collet et al (2011)
Transporte de insumos	0,8	tkm	Dado primário
<b>SAÍDAS</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Produto</b>			
Biomassa de microalgas	1	kg	Dado primário
<b>Emissões</b>			
Água	1998	L	Dado primário
Sais, não especificados	58	kg	Dado primário
DBO	8,0	g	Dado primário
Amônia	2,9	g	Dado primário
Nitrato (Cenário BFa)	23,7	g	Dado primário
Nitrato (Cenário BFb)	25,95	g	Dado primário
Pentóxido de fósforo	2,0	g	Dado primário

<b>FLUXOS EVITADOS (BFb)</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>	<b>Fonte</b>
<b>Recursos da natureza evitados</b>			
Água salgada	-2010	L	Dado primário
<b>Insumos evitados</b>			
Nitrato de sódio	-195	g	Dado primário
Cloreto de ferro hidratado	-10,4	g	Dado primário
Acido etilenodiamino tetra-acético	-13	g	Guillard (1975)
Cloreto de zinco hidratado	-0,0286	g	Guillard (1975)
Cloreto de cobalto hidratado	-0,026	g	Guillard (1975)
Molibdeto de amônio hidratado	-0,0104	g	Guillard (1975)
Sulfato de cobre hidratado	-0,02548	g	Guillard (1975)
Cloreto de manganês hidratado	-0,468	g	Guillard (1975)
Fosfato monob. de sódio hidratado	-20,8	g	Guillard (1975)
Tiamina (Vitamina B1)	-0,26	g	Guillard (1975)
Biotina (Vitamina B7)	-0,0013	g	Guillard (1975)
Cianocobalamina (Vitamina B12)	-0,0013	g	Guillard (1975)
Hipoclorito de sódio	-10	g	Guillard (1975)
<b>Energia evitada</b>			
Elettricidade (lagoa de tratamento)	-0,0017	kWh	Dado primário
<b>Emissões evitadas</b>			
DBO	-3,5	g	Dado primário
Amônia	-0,25	g	Dado primário
Pentóxido de fósforo	-21,2	g	Dado primário

O cultivo de microalgas é uma atividade desenvolvida em diversos locais do mundo com características diferentes e, por isso, essa atividade sofre influência direta de diversos fatores tais como: clima, luminosidade, salinidade da água, temperatura média e umidade do ar. Essas variações resultam em diferenças no potencial de produção das algas, nas demandas de matéria e energia e nos impactos ambientais gerados pelos processos produtivos. Outro fator relevante é a espécie de alga utilizada, que também influencia diretamente nos rendimentos dos cultivos.

Os estudos prévios de ACV da produção de microalgas demonstraram grande variabilidade nos valores obtidos. Os métodos utilizados nos estudos diferiram (por exemplo, as definições do sistema e as estimativas de fluxos), o que provavelmente contribuiu para essas diferenças nos resultados.

No que se refere a fluxos de matéria e energia, que fazem parte do inventário do ciclo de vida do produto, o presente estudo apresentou valores muito superiores aos obtidos nos estudos prévios, principalmente no que se refere a consumo de energia elétrica, utilização

de água salgada e consumo de fertilizantes (Tabela 11). Essa diferença pode estar associada à delimitação das fronteiras do sistema propostas por cada um dos trabalhos.

Tabela 11: Fluxos da produção de 1 kg de biomassa.

	Água salgada (L)	Fertilizantes (Nitrato e Fosfato) (g)	Eletricidade (kWh)
Campbell et al. (2011) Austrália	703,8	13,8	0,2
Collet et al. (2010) França	2900	3,84	0,4
Lardon et. al (2009) França	-	13,3	0,65
Presente estudo Cenário f/2	2010	215,8	54,14
Presente estudo Cenário 50/50	1447,5	116,5	65,13
Presente estudo Cenário BFa	1085	8,6	74,5
Presente estudo Cenário BFb	1085	8,6	74,4

Os trabalhos prévios de ACV analisados, embora apresentem valores de inventário referentes à mesma unidade funcional proposta neste estudo (1 kg de biomassa de microalgas), iniciam a análise do cultivo das microalgas, a partir da grande escala, em lagoas abertas de centenas de hectares de área. O presente estudo contempla também a fase laboratorial do ciclo, que compreende o desenvolvimento das algas desde a pequena escala (500 mL de cultura) até o cultivo em 400 L de meio. Nesse ambiente, há maior grau de controle das culturas, a fim de que se obtenha uma boa produtividade e sejam minimizados os riscos de contaminação, o que demanda um maior consumo de matéria e energia. Não foram encontrados estudos anteriores que incluam a fase laboratorial do cultivo de microalgas em sua Avaliação de Ciclo de Vida.

Outro ponto relevante na comparação com outros trabalhos é a questão temporal dos cultivos. Os estudos anteriores avaliam o inventário do processo produtivo das microalgas em função da estimativa da sua produtividade anual (em toneladas por ano) e, a partir

desse dado, são obtidos os valores dos fluxos de matéria e energia necessários para a produção de 1 kg de biomassa de algas, não considerando o tempo real necessário para se produzir essa quantidade específica de microalgas. O presente trabalho estabeleceu em sua unidade funcional o tempo de 30 dias para a produção dessa mesma massa de algas, o que pode implicar em uma necessidade de maior aporte de insumos e energia para esse sistema, em comparação aos demais.

Os estudos de ACV de microalgas, de maneira geral, valem-se da extrapolação de dados de escala laboratorial para a realização da sua avaliação, o que gera uma incerteza sobre os resultados obtidos. Este trabalho, embora não atinja a escala industrial de produção, apresenta dados reais obtidos *in loco*, representando a realidade dos cultivos de microalgas realizados no Laboratório de Cultivo de Algas da UFSC.

#### 4.2.2 Avaliação de Impacto Ambiental

A partir da construção do inventário de ciclo de vida, foi possível realizar a avaliação de impacto ambiental, utilizando como critérios as categorias de impacto citadas no item 4.1.1. Os valores obtidos em cada cenário para todas as categorias estão representados na Tabela 12.

Tabela 12: Impactos ambientais dos quatro cenários de produção de microalgas.

Categoria de impacto	Unidade	Cenário f/2	Cenário 50/50	Cenário BFa	Cenário BFb
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq.	0,0075	0,0065	0,0054	0,0005
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq.	0,0039	0,0111	0,0166	-0,0165
Potencial de Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq.	4,14	3,92	3,69	2,29
Toxicidade Humana	kg 1,4 DB eq.	2,34	2,20	2,05	1,04
Demanda de energia	MJ eq.	83,7	82,1	80,5	52,6

A Figura 13 apresenta a comparação entre os cenários de produção de microalgas, sendo adotado um procedimento de normalização que considera o cenário com o maior valor de impacto,

como o equivalente a 100% dos impactos para cada categoria, e os demais cenários relativizados a esse dado.

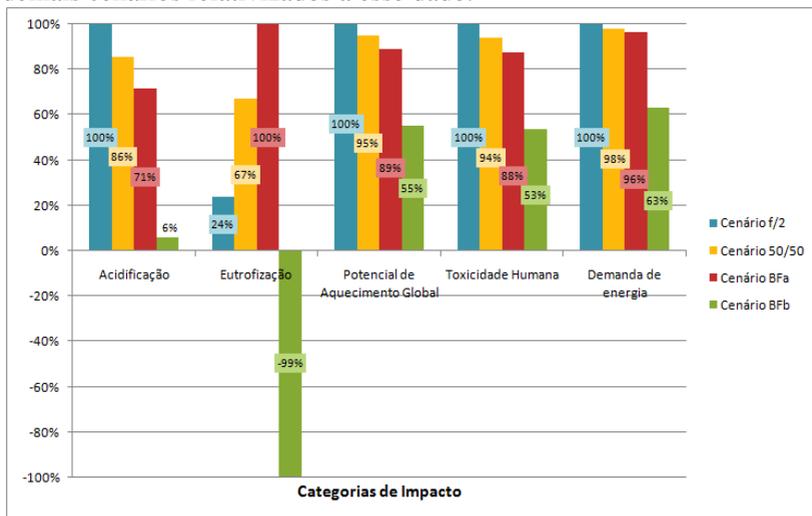


Figura 13: Impactos gerados em cada categoria nos quatro cenários.

Com exceção da categoria de impacto Eutrofização, o cenário f/2 apresentou um desempenho ambiental inferior aos demais cenários por kg de biomassa produzida. Em relação à eutrofização, BFa apresentou os maiores impactos e ainda foi possível observar os impactos positivos para essa categoria, obtidos em BFb. Por sua vez, o cenário BFb apresentou um melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto avaliadas, sendo que o cenário 50/50 foi o segundo mais impactante em todas as categorias, seguido pelo cenário BFa, que apresentou valores intermediários para todas as categorias.

#### 4.2.2.1 Acidificação

Em relação à acidificação, houve uma redução significativa de 96% dos impactos no cenário BFb, em relação ao f/2. Os cenários 50/50 e BFa apresentaram redução de 14% e 29%, respectivamente. Os impactos gerados por cada uma das categorias medidos em kg SO<sub>2</sub> eq. foram: f/2 - 0,00754, 50/50 - 0,00646, BFa - 0,00538 e BFb - 0,000482.

A Figura 14 indica os impactos gerados pelos principais fluxos da produção de microalgas em cada um dos cenários.

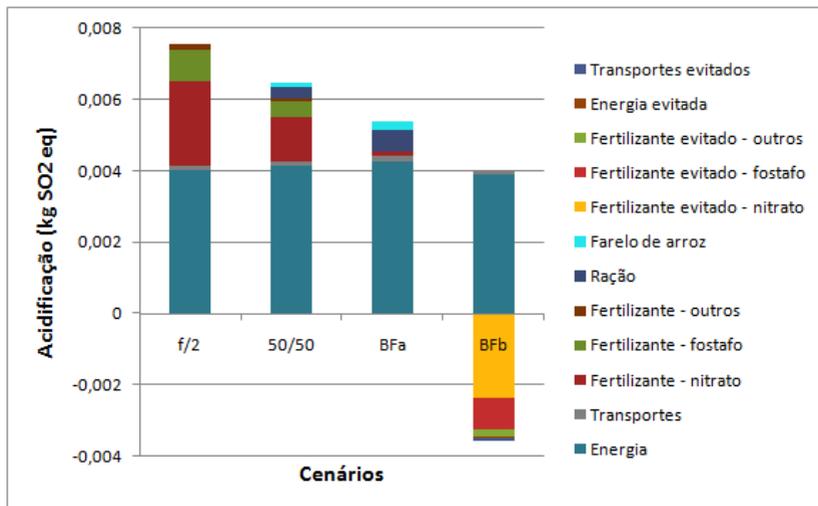


Figura 14: Impactos da acidificação para os quatro cenários de avaliação.

Para determinar a contribuição em porcentagem de cada um dos fluxos de matéria e energia para o valor final da categoria, foi considerado que o valor final obtido representa o total de impactos gerados por esse processo e os valores parciais de cada fluxo foram relativizados a esse. Os impactos positivos estão representados por valores negativos e também foram relativizados com os impactos negativos, considerando que a soma dos impactos negativos equivale a 100% dos impactos. Os valores, em porcentagem, obtidos estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Contribuição dos fluxos para Acidificação.

	f/2	50/50	BFa	BFb
Energia	53,1%	63,8%	79,5%	96,3%
Transportes	2,0%	2,3%	2,8%	3,7%
Fertilizante - nitrato	31,4%	19,0%	1,8%	-
Fertilizante - fosfato	11,7%	7,1%	-	-
Fertilizante – outros	1,9%	1,1%	-	-
Ração	-	4,9%	11,8%	-
Farelo de arroz	-	1,7%	4,1%	-
Fertilizante evitado – nitrato	-	-	-	-58,8%
Fertilizante evitado – fosfato	-	-	-	-22,0%
Fertilizante evitado - outros	-	-	-	-4,5%
Energia evitada	-	-	-	-1,6%
Transportes evitados	-	-	-	-1,0%

Na Figura 14 e na Tabela 13, percebeu-se que o principal fluxo contribuinte para a geração de impactos de acidificação é o de consumo de energia elétrica, apresentando de 53,1 a 96,3% de participação. Grande parte dessa contribuição está associada ao processo de extração de cobre para a utilização dele em redes de distribuição de energia e na queima de carvão em usinas termelétricas para a geração de energia.

Outros processos que apresentam contribuição significativa para a categoria de acidificação, são os de utilização de fertilizantes químicos de nitrato e fosfato em f/2 e 50/50. No cenário BFb, a não utilização desses fertilizantes representou uma redução nos impactos de 70,8%, em virtude da geração de impactos positivos. Os processos industriais de produção desses fertilizantes estão diretamente associados à geração de impactos ambientais para essa categoria.

#### 4.2.2.2 Eutrofização

Com relação à eutrofização, foi possível observar que o cenário mais impactante foi BFa, seguido por 50/50 e f/2 que apresentam redução de 33% e 76%, respectivamente. No cenário BFb, o procedimento de alocação adotado implica em geração de impactos

positivos que, para essa categoria, foram mais de duas vezes superiores ao impactos negativos, o que resultou em balanço final positivo para a eutrofização (Figura 15). Dessa forma, considerando o efluente de bioflocos como um resíduo e utilizando-o como meio de cultivo para a produção das microalgas, tem-se um ganho ambiental no que se refere a essa categoria de impacto.

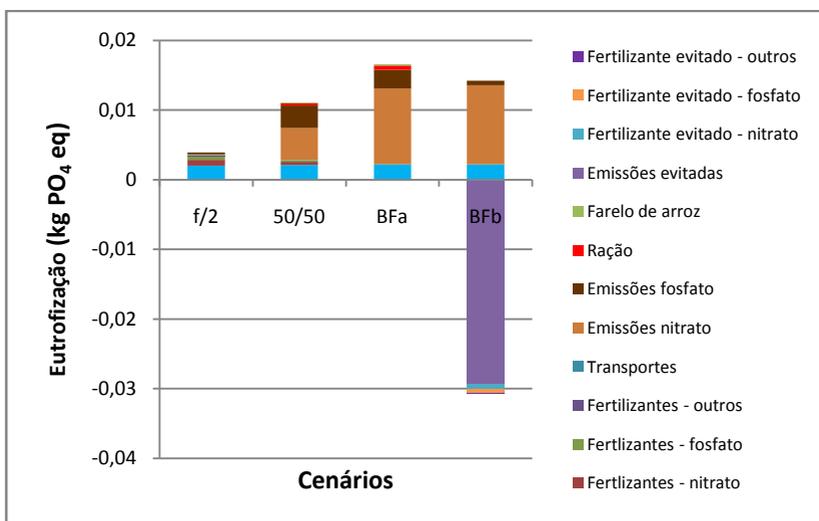


Figura 15: Impactos de eutrofização para os quatro cenários de avaliação.

A Tabela 14 apresenta a contribuição de cada um dos fluxos do processo produtivo, em relação ao total de impacto gerado pela categoria eutrofização.

Tabela 14: Contribuição dos fluxos para Eutrofização.

	f/2	50/50	BFa	BFb
Energia	51,5%	19,1%	13,3%	15,5%
Fertilizantes - nitrato	21,8%	4,1%	-	-
Fertilizantes - fosfato	11,5%	2,2%	-	-
Fertilizantes - outros	3,3%	-	-	-
Transportes	2,6%	0,7%	-	-
Emissões nitrato	2,6%	41,0%	65,7%	80,2%
Emissões fosfato	6,6%	29,0%	16,1%	4,3%
Ração	-	3,1%	3,7%	-
Farelo de arroz	-	0,9%	1,2%	-
Emissões evitadas	-	-	-	-206,1%
Fertilizante evitado - nitrato	-	-	-	-5,4%
Fertilizante evitado - fosfato	-	-	-	-3,5%
Fertilizante evitado - outros	-	-	-	-1,0%

A Figura 15 e a Tabela 14 demonstram que no cenário f/2 a energia foi o principal fator contribuinte para essa categoria de impacto. Nesse caso, a produção de energia elétrica está associada à eutrofização, no que se refere principalmente à geração de resíduos no processo produtivo de fios de cobre e disposição final de resíduos das termelétricas. Nesse cenário, também foram relevantes os processos produtivos de fertilizantes de nitrato e fosfato que apresentaram impacto relevante de eutrofização. As emissões diretas do cultivo de microalgas em f/2 apresentaram menor representatividade em relação aos demais, pois a redução dos nutrientes dissolvidos nesse meio foi superior aos outros meios de cultivo, conforme citado no capítulo anterior.

Nos cenários 50/50 e BFa, as emissões de nitrato e fosfato para o ambiente apresentaram-se como maiores contribuintes para o impacto de eutrofização. No experimento descrito no capítulo dois, é possível perceber que as algas cultivadas em bioflocos não consumiram toda a matéria orgânica presente no meio de cultivo. Dessa forma, foram descartadas maiores quantidades de nitrato e fosfato no ambiente, o que é diretamente responsável por impactos ambientais associados à eutrofização da água dos corpos receptores desse efluente. O consumo de energia também apresentou contribuição significativa nesses

cenários, representando 19,1% dos impactos de eutrofização em 50/50 e 13,3% dos impactos em BFa.

A categoria de impacto eutrofização foi a mais afetada pelo procedimento de alocação adotado em BFb. Isso se deve ao fato de que esse cenário considera que o não descarte parcial de efluentes de nitrato e fosfato representa um impacto positivo, ou seja, contribui para a prevenção da eutrofização dessas águas. Porém, como já observado anteriormente, o cultivo de microalgas em efluente não consome totalmente os nutrientes que estão diluídos no meio de cultura e, sendo assim, ainda temos impacto gerado pela emissão de uma parte dessa matéria orgânica. Porém, o impacto evitado pela não produção dos fertilizantes e a dispensa de tratamento do efluente é mais de duas vezes superior ao negativo. Essa constatação baseia-se na literatura, que considera que o tratamento dos efluentes apresenta eficiência de 30% (VON SPERLING, 2001). Sendo assim, percebeu-se que a remoção dos nutrientes pelas microalgas foi superior a essa taxa.

#### 4.2.2.3 Potencial de Aquecimento Global

No tocante a impactos associados ao potencial de aquecimento global, o cenário f/2 foi o que apresentou os maiores valores de emissão, medidos em kg CO<sub>2</sub> eq. O cenário 50/50 apresentou redução de 5% nos impactos ambientais e o BFa reduziu em 11% os valores de potencial de aquecimento global, em relação a f/2. Novamente BFb foi o cenário menos impactante, apresentando redução de 45% nos impactos ambientais, conforme pode ser observado na Figura 16.

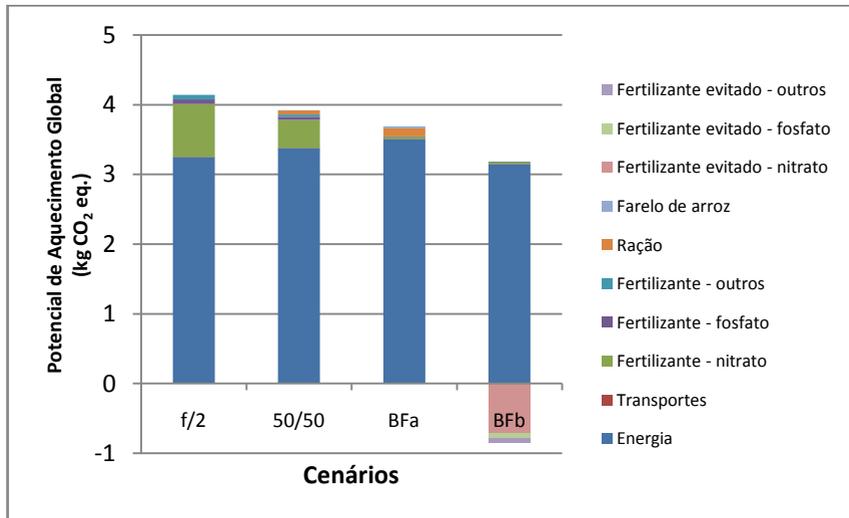


Figura 16: Impactos do potencial de aquecimento global para os quatro cenários de avaliação.

A partir desses dados, é possível calcular, também, a contribuição de cada um dos fluxos do processo produtivo, em relação ao total de impacto gerado por essa categoria, apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Contribuição dos fluxos para Potencial de Aquecimento Global.

	f/2	50/50	BFa	BFb
Energia	78,50%	86,22%	95,12%	98,96%
Transportes	0,02%	0,03%	0,03%	0,03%
Fertilizante - nitrato	18,36%	10,20%	0,84%	0,94%
Fertilizante - fosfato	1,59%	1,15%	-	0,03%
Fertilizante - outros	1,52%	0,84%	-	0,03%
Ração	-	1,53%	3,22%	-
Farelo de arroz	-	-	0,73%	-
Fertilizante evitado - nitrato	-	-	-	-22,62%
Fertilizante evitado - fosfato	-	-	-	-2,01%
Fertilizante evitado - outros	-	-	-	-1,89%
Energia evitada	-	-	-	-1,54%

A partir da análise da Figura 16 e da Tabela 15, pode-se observar que novamente o consumo de energia é caracterizado como o principal processo contribuinte para a geração de impactos ambientais associados ao processo produtivo de biomassa de microalgas. No que se refere à potencial de aquecimento global, o consumo de energia pode representar entre 78,5% dos impactos em f/2 até 98,96% dos impactos no cenário BFb.

O consumo de energia está associado ao aquecimento global porque a matriz energética brasileira inclui a geração de energia por meio de usinas termelétricas, a carvão e a biogás, que geram grandes quantidades de emissões de gases, tais como monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, entre outros. Esses gases são considerados GEE (Gases de Efeito Estufa), o que contribui para os impactos dessa categoria. Além disso, também se tem impactos gerados pelo processo produtivo dos fios de cobre, utilizados nas redes de distribuição de energia, que gera quantidade significativa de GEEs, também contribuindo para os impactos de potencial de aquecimento global.

Nos cenários f/2 e 50/50, há também importante participação na geração de impactos associada à produção dos fertilizantes a base de nitrato de sódio, utilizados nesses cultivos (18,36% e 10,2%, respectivamente). Esse fator pode ser observado no cenário BFb configurando impacto positivo de 22,62% em relação ao total dos impactos negativos desse cenário. Uma vez que se considerou que a não utilização do meio de cultura com fertilizantes no cultivo, este se configura como um produto evitado pelo sistema. Dessa forma, a não utilização desse fertilizante torna-se um fator importante para a redução impacto de potencial de aquecimento global nessa configuração de cenário.

#### 4.2.2.4 Toxicidade Humana

O cenário f/2 apresentou os maiores valores de impactos ambientais, com relação à toxicidade humana, totalizando 2,4 kg 1,4-DB eq. Com relação a esse, os demais cenários apresentaram redução dos impactos ambientais, como pode ser observado na Figura 17. O cenário 50/50 apresentou redução de 5%, enquanto BFa apresentou redução de 11% e BFb de 14%.

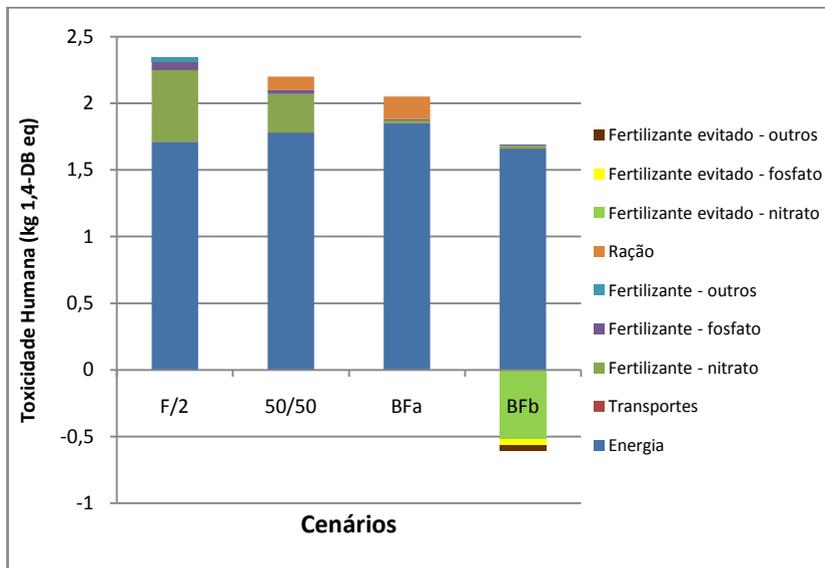


Figura 17: Impactos da toxicidade humana para os quatro cenários de avaliação.

Também podemos analisar as contribuições de cada um dos processos, em relação ao total de impactos do cenário, por meio da Tabela 16.

Tabela 16: Contribuição dos fluxos para Toxicidade Humana.

	f/2	50/50	BFa	BFb
Energia	73,08%	80,91%	90,24%	98,10%
Transportes	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
Fertilizante - nitrato	23,08%	13,18%	1,07%	1,30%
Fertilizante - fosfato	2,56%	1,36%	0,49%	0,59%
Fertilizante - outros	1,28%	-	-	-
Ração	-	4,55%	8,19%	-
Fertilizante evitado - nitrato	-	-	-	-28,64%
Fertilizante evitado - fosfato	-	-	-	-2,84%
Fertilizante evitado - outros	-	-	-	-2,05%

Através da análise da Figura 17 e da Tabela 16, é possível perceber que também na categoria de toxicidade humana o consumo de

energia é o principal contribuinte para geração de impactos, representando de 73,08% a 98,10% dos impactos totais para cada cenário. A geração de resíduos nos processos produtivos dos fios de cobre, utilizados na rede de distribuição, tem impacto significativo para esse processo, além dos processos de produção de energia que por si só geram impactos de toxicidade humana.

Nos cenários f/2 e 50/50, temos uma importante contribuição para os impactos ambientais, gerada pela produção dos fertilizantes a base de nitrato, utilizados nos cultivos de microalgas. Esses processos representam 23,08% e 13,18% dos impactos para f/2 e 50/50, respectivamente. No cenário BFb, a não utilização de fertilizantes a base de nitrato na etapa de cultivo massivo representa um impacto positivo de 28,64%, em relação aos impactos totais gerados nesse cenário, de acordo com o procedimento de alocação adotado.

A produção de ração para o cultivo superintensivo de camarões apresenta uma pequena, porém significativa, contribuição para os impactos de toxicidade humana dos cenários 50/50 e BFa (4,55% e 8,19%, respectivamente). Esses impactos estão associados, principalmente com os cultivos de soja e de cana-de-açúcar, que são componentes importantes da ração desses animais.

#### 4.2.2.5 Demanda acumulada de energia

Com relação à demanda de energia, foram obtidos valores totais muito semelhantes entre os cenários f/2, 50/50 e BFa. Desses, a maior demanda de energia foi obtida em f/2, com o valor total de 83,7 MJ eq de energia para a produção de 1 kg de biomassa algal. Os cenários 50/50 e BFa apresentaram uma pequena redução nos valores totais de 2% e 4%, respectivamente. Apenas no cenário BFb, foi possível observar uma redução mais significativa da demanda de energia de aproximadamente 34%, em relação ao valor encontrado em f/2.

Uma vez que o consumo de energia foi identificado como potencial causador de impactos ambientais em todas as categorias de impacto analisadas, ele foi subdividido entre as etapas do processo produtivo das microalgas, a fim de que se identificassem aquelas que representam a maior contribuição para a demanda de energia de cada um dos cenários. A contribuição de cada uma das etapas do processo

produtivo para a demanda acumulada de energia está representada na Figura 18.

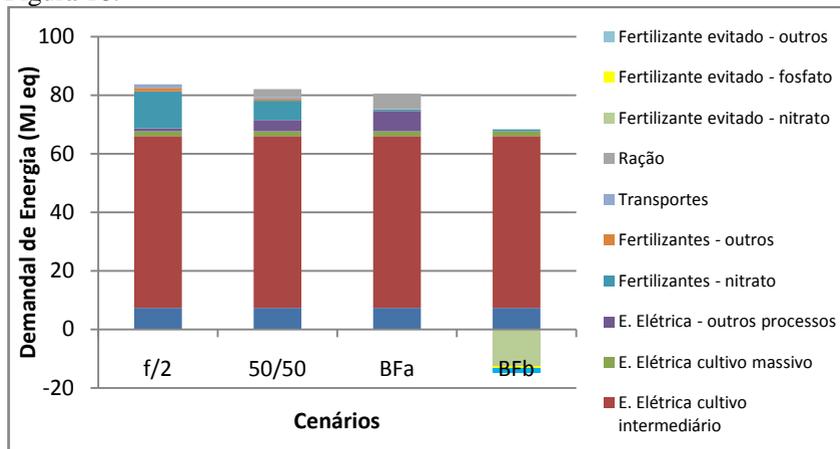


Figura 18: Demanda acumulada de energia para os quatro cenários de avaliação.

A contribuição de cada uma das etapas para a demanda acumulada de energia total do cenário também pode ser observada na Tabela 17.

Tabela 17: Contribuição das etapas para a Demanda Acumulada de Energia.

	f/2	50/50	BFa	BFb
E. Elétrica cultivo inicial	8,8%	9,0%	9,1%	10,8%
E. Elétrica cultivo intermediário	70,2%	71,5%	72,9%	86,0%
E. Elétrica cultivo massivo	1,9%	1,9%	2,0%	2,3%
E. Elétrica - outros processos	1,3%	4,7%	8,7%	
Fertilizantes - nitrato	15,1%	8,0%	0,6%	0,7%
Fertilizantes - outros	1,5%	0,8%	-	-
Transportes	1,4%	0,9%	-	-
Ração	-	3,2%	6,5%	-
Fertilizante evitado - nitrato	-	-	-	-18,4%
Fertilizante evitado - fosfato	-	-	-	-0,9%
Fertilizante evitado - outros	-	-	-	-2,1%
Energia elétrica evitada	-	-	-	-1,6%

Na Figura 18 e na Tabela 17, constata-se que a maior parte da demanda de energia está na etapa de cultivo intermediário das microalgas. Essa etapa representa uma demanda de 70,2% da energia no cenário f/2 e até 86% da energia em BFb. Correlacionando esses dados com os obtidos no Inventário de Ciclo de Vida, percebe-se que é no cultivo intermediário que está o maior consumo energético em kWh, associado à iluminação artificial do cultivo provida de lâmpadas fluorescentes.

Esse estudo considerou que são necessárias quatro lâmpadas de 40 W iluminando constantemente os 400 litros de cultivo intermediário de microalgas por 9 dias, o que representa grande demanda de energia e, conseqüentemente, consumo energético significativo. Esse fato indica que a iluminação do cultivo intermediário é um dos principais *hotspots* do cultivo de microalgas analisado nesse estudo e que necessita de ajustes, a fim de tornar o processo menos impactante.

A utilização de iluminação artificial a base de lâmpadas fluorescentes também foi observada no cultivo inicial que, por sua vez, representa parcela significativa na demanda acumulada de energia em todos os cenários, variando entre 8,8 a 10,8% de contribuição. Além das lâmpadas, os compressores de ar utilizados para aeração das culturas também estão incluídos no consumo energético dessa etapa do cultivo.

Ainda no que se refere a consumo de energia, pode-se observar que há uma demanda significativa de energia associada a “outros processos” nos cenários 50/50 e BFa (4,7 e 8,7% do total do cenário, respectivamente). Entre os processos incluídos nessa etapa, estão os associados à produção de camarão superintensivo com bioflocos, tais como a energia consumida por aeradores e trocadores de calor utilizados nesses cultivos. Também estão incluídos, nessa etapa, os processos de extração das algas, por centrifugação.

Nos cenários f/2 e 50/50 também é possível observar relevante contribuição da produção de fertilizantes à base de nitrato de sódio para demanda acumulada de energia. Essa contribuição representa 15,1% da demanda de energia total em f/2 e 8% em 50/50. Analisando o processo produtivo dos fertilizantes de nitrato, é possível perceber que boa parte da demanda energética desse processo está associada à energia térmica gerada pela queima de gás natural em fornos nas indústrias produtoras desses fertilizantes. No cenário BFb, a influência da não utilização deste material ficou bastante evidente, pois foi constatado que há uma redução de 18,4% da demanda de energia total do cenário, com a substituição

desses fertilizantes pelos resíduos do cultivo superintensivo de camarão com bioflocos.

### **4.2.3 Influência da alocação nos resultados**

Na comparação entre os cenários BFa e BFb, foi possível constatar a forte influência que o procedimento de alocação adotado em cada um dos cenários teve sobre os resultados. No cenário BFa, foi considerado que no processo de produção superintensiva de camarões, são gerados dois coprodutos com valor econômico (camarões e efluente). Por outro lado, no cenário BFb foi considerado que o efluente de cultivo de camarões com bioflocos é um resíduo e, sendo assim, não apresenta impactos ambientais associados a ele quando utilizado como matéria prima para a produção de microalgas. Além disso, considera-se que a dispensa da necessidade de tratamento desse efluente e a não produção de fertilizantes químicos configuram impactos positivos para esse cenário.

Ao adotar o procedimento de alocação econômica em BFa, foram direcionados 94,8% dos impactos totais do processo produtivo para os camarões produzidos e 5,2% para o efluente e, por isso, parte dos impactos associados a produção de camarões foi percebida quando foi realizada a avaliação de impacto do cultivo de microalgas que utiliza esse produto. Em contrapartida, no cenário BFb não somente foram desconsiderados os impactos ambientais do cultivo superintensivo de camarões, como também foram creditados os impactos positivos do tratamento final evitado de efluentes e dos produtos evitados.

Tais considerações se refletem nas grandes diferenças nos resultados da avaliação de impacto ambiental em todas as categorias. O processo produtivo dos camarões é altamente custoso, sob o ponto de vista da demanda de grande quantidade de energia e de nutrientes (MAGNOTTI, 2011), e, da mesma forma, são os efluentes gerados no processo. Porém, conforme descrito no capítulo dois, esses efluentes são ricos em nutrientes dissolvidos e apresentam-se com potencial para utilização em alguns processos produtivos. Dessa forma, poderiam deixar de ser considerados resíduos e representarem um produto de interesse econômico. Sendo assim, é importante que novos estudos sejam realizados para que se amplie a discussão sobre a melhor forma

de qualificar esse efluente e, conseqüentemente, qual procedimento de alocação é mais adequado para essa situação.

#### **4.2.4 Comparação da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida**

No tocante à avaliação de impactos, a maioria dos estudos de ACV de microalgas limita-se em avaliar o desempenho dos cultivos sob o ponto de vista do potencial de aquecimento global e da demanda energética. Além disso, suas fronteiras de sistema, em geral, contemplam a fase de conversão dos lipídios em biodiesel, a distribuição desse combustível e o seu uso. Dessa forma, são estabelecidas unidades funcionais em função da quantidade de energia gerada pela queima do biodiesel produzido em um motor à combustão. Esses fatores dificultam a comparação entre os valores de impactos das categorias desses estudos e os valores do presente trabalho.

De maneira geral, os estudos afirmam que, mesmo considerando outros coprodutos geradores de energia que podem ser extraídos das microalgas (por exemplo, bioetanol e biogás), a quantidade de energia gerada pela queima do biodiesel tende a ser menor do que a demanda de energia necessária para a sua produção (SANDER; MURTHY, 2010; CLARENS et al., 2009). O estudo de Lardon et al. (2009) afirma que o biodiesel de microalgas só seria energeticamente viável caso fosse cultivado em ambiente com baixo suprimento de nitrogênio e fosse realizada a extração de lipídios sem a utilização do processo de secagem das algas. Uma vez que o presente estudo apresenta um consumo energético superior ao descrito nesses estudos, é provável que o biodiesel produzido, a partir dessas algas, também apresente rendimento energético líquido menor do que a demanda de energia necessária para a sua produção.

Na bibliografia, percebeu-se que alguns estudos de ACV de produção de microalgas que apresentam a avaliação de impacto ambiental e utilizam categorias semelhantes às deste trabalho são: Lardon et al. (2009) e Collet et al. (2010). Nesses trabalhos também foi possível perceber que grande parte dos impactos ambientais gerados são referentes ao consumo de energia, resultando em mais de 50% de contribuição, no que se refere à acidificação, eutrofização, toxicidade

humana e potencial de aquecimento global. Esses dados vão ao encontro dos resultados obtidos nesse estudo.

O estudo de Lardon et al. (2009) cita ainda a produção de fertilizantes com parcela menor, porém significativa (aproximadamente 10%) de contribuição para a geração dos impactos ambientais nas categorias de impacto acidificação, eutrofização e toxicidade humana, valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho. Os trabalhos de Lardon et al. (2009) e Collet et al. (2010) ainda fazem menção ao processo de combustão do biodiesel como gerador de impactos ambientais de eutrofização, acidificação e potencial de aquecimento global. Porém, essa etapa não fez parte das fronteiras do sistema deste estudo.

Foi identificado que o principal processo utilizador de energia elétrica nos três cenários foi o de iluminação artificial, utilizado nos cultivos iniciais e principalmente nos intermediários, representando até 95,7% do consumo total de energia para a produção de 1 kg de biomassa de microalgas. É importante salientar novamente que os estudos de ACV de microalgas, de maneira geral, não contemplam fase laboratorial em suas avaliações. No presente estudo, essas etapas configuraram-se como as principais geradoras de impacto ambiental e, sendo assim, é importante que elas sejam incluídas nas avaliações ambientais relativas à produção de microalgas.

Além da demanda de energia, as outras categorias de impacto também foram fortemente afetadas por esse consumo energético. Portanto, a redução na utilização de iluminação com lâmpadas, especialmente na etapa de cultivo intermediário, implicaria em significativa redução dos impactos gerados pela produção de microalgas, em todas as categorias estudadas nesse trabalho.

Uma alternativa para isso seria o estudo da viabilidade da realização do cultivo intermediário em ambiente aberto, utilizando a luz solar como fonte de iluminação. Outra questão importante seria a implantação de uma rede de energia elétrica de média voltagem, em substituição a rede de baixa voltagem existente, o que implicaria em redução de até 30% dos impactos ambientais relacionados à toxicidade humana, acidificação, eutrofização e potencial de aquecimento global.

### 4.3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Por meio da realização da Avaliação de Ciclo de Vida, foi possível observar que os impactos gerados pelo cultivo de microalgas podem ser reduzidos quando se utiliza o efluente do cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos como meio de cultura. Essa redução pode ser observada nos impactos ambientais referentes à acidificação, eutrofização, potencial de aquecimento global e toxicidade humana, além de reduzir também a demanda de energia acumulada para a realização do processo.

Por outro lado, percebeu-se que os nutrientes presentes no efluente não foram totalmente consumidos nas culturas de microalgas e, por esse motivo, ainda causou muitos impactos ambientais associados à eutrofização. Portanto, é importante que se estudem alternativas de disposição desse resíduo, ou ainda diferentes propostas de cultivo, a fim de que se consiga depurar toda essa matéria orgânica antes da liberação desse efluente para os corpos d'água, diminuindo, assim, o impacto de eutrofização desse processo.

Uma das alternativas é a reutilização desse efluente para o processo de cultivo superintensivo de camarões, reduzindo o consumo de água dessa etapa. Outra opção é o tratamento do efluente gerado pelo cultivo de microalgas antes da sua disposição final. Para ambos os processos, é importante que se façam estudos para que se tenham novos dados e seja possível a proposição de novos cenários para avaliação ambiental desse sistema.

Por meio desse estudo, foi possível identificar os principais *hotspots* do processo produtivo das microalgas, dentre os quais o consumo de energia foi o principal responsável pela maior parte dos impactos ambientais em todas as categorias. Quando avaliadas as etapas do processo, a mais impactante foi a de cultivo intermediário, na qual se utilizam lâmpadas fluorescentes para iluminação artificial dos cultivos. É importante que se proponham novas alternativas para essa etapa, visando a redução do consumo energético, bem como meios alternativos de iluminação como, por exemplo, a sua realização em ambiente com iluminação natural.

Além disso, destaca-se que os estudos de ACV de produção de microalgas devem incluir as etapas laboratoriais em seus sistemas, pois, a partir deste trabalho, foi possível perceber a relevância que esses

processos apresentam no que se refere à geração de impactos ambientais.

Para estudos futuros, recomenda-se também que sejam incluídas nas avaliações de ciclo de vida, uma análise detalhada dos impactos ambientais relativos às emissões atmosféricas geradas pelos cultivos de microalgas. De acordo com Fagerstone et al. (2011), há uma carência de dados referentes a esse fluxo de matéria e esse fator pode apontar resultados diferentes dos obtidos até então nos estudos de ACV.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho permitiu analisar a viabilidade técnica e avaliar o ciclo de vida da utilização do efluente de cultivo superintensivo de camarões com bioflocos como fonte alternativa de nutrientes para a produção de microalgas, sendo atingido o objetivo geral proposto. A seguir, serão apresentadas as conclusões referentes a cada um dos objetivos específicos.

Quanto ao objetivo específico 1: **“Determinar a viabilidade técnica da utilização de efluentes do cultivo superintensivo de camarões como meio de cultura para microalgas”**, foi possível observar que houve um ganho de 17,5% de desempenho, no que se refere a crescimento das algas e produção de biomassa quando utilizado o efluente de cultivo superintensivo de camarões com bioflocos, aqui denominado meio BF, em comparação com o meio tradicional de cultivo (f/2) que utiliza fertilizantes químicos (0,4 e 0,33 g/L, respectivamente). Também foi avaliada a utilização de 50% do meio de cultivo utilizando f/2 e 50% do cultivo utilizando efluente, denominado 50/50 e foi obtida uma produção de biomassa semelhante àquela obtida utilizando apenas fertilizantes químicos no cultivo (0,33 g/l).

Foi realizada uma análise do teor de lipídios e ésteres, presentes na biomassa cultivada, nos três diferentes meios de cultivo e percebeu-se que não houve diferenças significativas nas quantidades acumuladas, em relação aos meios de cultivo utilizados nesse estudo. Com relação à produtividade por área dos cultivos, em relação à de biomassa e teor de lipídios, é possível concluir que o método de cultivo proposto nesse estudo é, até o presente momento, inviável para a produção de biodiesel em larga escala e necessita de aprimoramentos para que se atinja essa meta, especialmente no que se refere a ganho de produtividade.

A análise dos parâmetros químicos dos meios de cultivo demonstrou que o cultivo de microalgas pode ser uma alternativa viável para a remoção dos nutrientes presentes no efluente do cultivo de camarão. Embora o consumo dos nutrientes tenha sido mais eficiente no meio f/2, foi observada redução nas concentrações de nitrato, nitrito, amônia e ortofostato dos meios 50/50 e BF, além da redução da taxa de DBO no meio BF.

No que se refere ao objetivo 2: **“Avaliar o desempenho ambiental das culturas de produção das microalgas destinadas à produção de biodiesel, segundo a técnica de Avaliação do Ciclo de**

**Vida”**, foi possível observar que os sistemas de cultivo analisados, utilizando fertilizantes químicos com efluente, ou ainda o meio que usa 50% de cada uma dessas matérias-primas, apresentam impactos ambientais significativos, em relação a acidificação, eutrofização, potencial de aquecimento global e toxicidade humana.

A maior parte desses impactos está associada diretamente ao consumo energético dos três cenários de produção, ligada a fatores como queima de carvão em termelétricas para a produção de energia e utilização de ligas metálicas de cobre nos fios da rede de distribuição de energia. Esse fato pode ser corroborado pelos valores de demanda acumulada de energia encontrada em todos os cenários de avaliação, que foram superiores aqueles descritos na literatura para a produção de 1 kg de biomassa de microalgas. Esse grande consumo de energia é um dos principais entraves da produção dessas algas para a extração de biodiesel, pois a energia gerada pela queima do combustível, produzido a partir dessa biomassa, será provavelmente inferior ao total de energia empregado para sua produção.

Analisando o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da produção de microalgas, podemos identificar a iluminação artificial do cultivo intermediário, provida por lâmpadas fluorescentes, como principal processo consumidor de energia elétrica. Conseqüentemente, essa etapa do processo é responsável pela maior parte dos impactos ambientais gerados pelo consumo de energia. Conclui-se, portanto, que são necessárias adequações nesse processo produtivo, propondo ajustes no processo produtivo da biomassa de microalgas, para que se alcance um cenário de produção mais favorável.

Outras etapas do processo também apresentaram contribuição significativa para a geração dos impactos ambientais. Entre elas, podemos destacar a produção de fertilizantes químicos, especialmente de nitrato e fosfato e a produção de ração para alimentação dos camarões.

Com relação ao objetivo 3: **“Determinar o impacto relativo da substituição dos fertilizantes por efluentes do cultivo superintensivo de camarões como matéria-prima no processo produtivo das algas”**, o presente estudo constatou que a utilização de efluentes de cultivo superintensivo de camarões marinhos com bioflocos em substituição ao meio de cultivo tradicional, que emprega fertilizantes químicos, reduz os impactos ambientais gerados pelo sistema produtivo, no que se refere à potencial de aquecimento global, acidificação e toxicidade humana, além de reduzir também a demanda acumulada de energia da produção

de microalgas. Esses fatores indicam uma possível alternativa de produção que gera menos impactos ambientais, pois dispensa o uso de fertilizantes químicos e parte do tratamento dos efluentes do cultivo superintensivo de camarões.

No entanto, percebeu-se que o procedimento de alocação adotado na construção da ACV, no que se refere aos efluentes do cultivo superintensivo de camarões, exerceu forte influência sobre os resultados obtidos. No cenário em que esse efluente é considerado um resíduo e, sendo assim, a dispensa do seu tratamento configura-se como impacto positivo do processo, os valores de impactos ambientais encontrados foram inferiores aos do cenário onde esse efluente foi considerado um subproduto da produção, pois, nesse caso, o efluente incorpora uma parte dos impactos gerados pela produção do camarão. Essa influência pode ser observada na categoria de impacto Eutrofização, no qual o cenário BFa, que considera o efluente um subproduto, apresentou os maiores valores de impacto e, por sua vez, o cenário BFb, que o considera um resíduo, apresentou impactos positivos para esse categoria, em função do tratamento final evitado dos efluentes.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 20p. 2009a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 46p. 2009b.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Produção Nacional de Biodiesel puro B100 (metros cúbicos)**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em 11 maio 2012.

ANTONI, D.; ZVERLOV, V. V.; SCHWARZ, W. H. Biofuels from microbes. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** n. 77. p. 23-35. 2007.

APHA/AWWA/WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington DC: APHA. 2005.

ARREDONDO-VEGA, B. O. **Crecimiento autotrófico y mixotrófico de la microalga marina *Porphyridium cruentum***. Tese (Doutorado) - Facultad de Farmácia, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 138p. 1995.

AVNIMELECH, Y. Bio-filters: the need for a new comprehensive approach. **Aquacultural Engineering**. n. 34, p. 172–178. 2006.

BRASIL. Lei nº 11.997, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. **Diário oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 14 jan. 2005. disponível em <<http://www.anp.gov.br/NXT/gateway.dll>>. Acesso em 10 janeiro 2012.

BURFORD, M.A.; THOMPSON, P.J.; MCINTOSH, R.P.; BAUMAN, R.H.; PEARSON, D.C. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. **Aquaculture** n. 219, p. 393-411. 2003.

CAMPBELL, P. K.; BEER, T.; BATTEN, D. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. **Bioresource Technology**. n. 102, p. 50–56, 2011.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 1998.

CHIU, S.Y.; KAO, C.Y.; TSAI, M.T.; ONG, S.C.; CHEN, C.H.; LIN, C.S. Lipid accumulation and CO<sub>2</sub> utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO<sub>2</sub> aeration. **Bioresource Technology**. n. 100 p. 833-840. 2009.

CHISTI, Y. Microalgae: our marine forests. **Biotechnology Advances**, n. 22, p. 565-567. 2004.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**. n. 25, p. 294–306. 2007.

CLARENS, A. F.; RESSURRECCION, E., P; WHITE, M. A.; COLOSI, L., M. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. **Environmental Science and Technology** n. 44, p. 1813–1819. 2010.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; RAS, M. ; GOY, R.; STEYER, J. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. **Bioresource Technology**. n. 102, p. 207-214. 2011.

COM - COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.

**Biofuel Progress Report.** Disponível em:

<[http://ec.europa.eu/energy/energy\\_policy/doc/07\\_biofuels\\_progress\\_report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/07_biofuels_progress_report_en.pdf)>. Acesso em: 15 janeiro 2010.

CRUTZEN, P. J.; MOSIER, A. R.; SMITH, K. A.; WINIWARTER, W. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmos. Chem Phys.** n. 8. p. 389-395. 2008.

DE SCHRYVER, P.; CRAB, R.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. **Aquaculture.** n. 277, p. 125-137. 2008.

DERNER, R B. **Efeito de fontes de carbono no crescimento e na composição bioquímica das microalgas *Chaetoceros muelleri* e *Thalassiosira fluviatilis*, com ênfase no teor de ácidos graxos poliinsaturados.** 158p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

DERNER, R. B.; OSHE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S. M.; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. **Ciência Rural.** n. 6, p. 1959-1967. 2006.

ECOINVENT. Ecoinvent data v2.2. **Ecoinvent reports.** Dusseldorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 25p. 2010.

EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041 – a critical review. **Journal of Cleaner Production,** n. 9, p.197-208, 2001.

EMERENCIANO, M. G. C.; WASIELESKY JR, W.; SOARES, R. B.; BALLESTER, E. C.; IZEPII, E. M. CAVALLI, R. O. Crescimento e sobrevivência do camarão-rosa (*Farfantepenaeus paulensis*) na fase de berçário em meio heterotrófico **Acta Scientiarum Biological Sciences** n. 1, p. 1-7. 2007.

FAGERSTONE, K. D.; QUINN, J. C. ; BRADLEY, T. H. ; DE LONG, S. K. ; MARCHESE, A. J. Quantitative measurement of direct nitrous oxide emissions from microalgae cultivation. **Environmental Science and Technology**. n. 45 p. 9449-9456. 2011.

FRICHKNECHT, R. LCI modeling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. In: **The International Conference R'07**. Davos, Switzerland, 2007

FULKS, W.; MAIN, K. L.. Rotifer and Microalgae Culture Systems. In: **US-ASIA Workshop, 1991**, The Oceanic Institute, Honolulu, 364 p., 1991

GALINDRO, B. M.; ALVARENGA, R. A. F.; HELPA, C. F.; SOARES, S. R. The recycling of oyster shells: An environmental analysis using Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**. n. 106, p. 102-109. 2012.

GUILLARD, R. R. L. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In: SMITH, W. L.; CHARLEY, M. H. (eds.). **Culture of Marine Invertebrate Animals**. New York: Plenum, p. 29-60. 1975.

GUINÉE, J. B. (Ed.). **Handbook of Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HUO, H. et al. Life-Cycle Assessment of energy use and greenhouse gas emissions of soybean-derived biodiesel and renewable fuels.

**Environmental Science and Technology**, n. 43, p.750-756, 2009.

JAMES, C. M.; AL-KHARS, A. M. An intensive continuous culture system using tubular photobioreactors for producing microalgae.

**Aquaculture**. n. 87 p. 381-393. 1990.

JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; EMBIRUÇU, M.; GHIRARDI, M. L. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors.

**Bioresource Technology**. n. 101, p. 1406–1413, 2010.

KIM, S.; DALE, B. E.. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel.

**Biomass & Bioenergy**, n. 29, p. 426-439, 2005.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.; BERNARD, O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae.

**Environmental Science and Technology**. n. 17, p. 6475-6481, 2009.

LOURENÇO, S. O. **Cultivo de microalgas marinhas – princípios e aplicações**. São Carlos: RiMa, 606 p., 2006.

MAGNOTTI, C. C. F. **Cultivo heterotrófico do camarão marinho *Litopenaeus vannamei* avaliando duas metodologias de remoção de sólidos**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Aquicultura – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 39p. 2011.

MAJER, S. ; MUELLER-LANGER, F. ; ZELLER, V. ; KALTSCHMITT, M. Implications of biodiesel production and utilisation on global climate - A literature review. **Eur. J. Lipid Sci. Technol.**, n. 111, p.747-762, 2009.

MARZULLO, R. de C. M. **Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando à produção de biodiesel.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 216 p., 2006.

McGINN, P. J.; DICKINSON, K. E.; BHATTI, S.; FRIGON, J.; GUIOT, S. R.; O'LEARY, S. J. B. Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations. **Photosynth. Res.** n. 109, p. 231-247, 2011.

MOURAD, A. L. **Avaliação da Cadeia Produtiva de Biodiesel.** Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 141 p., 2008.

PANICHELLI, L.; DAURIAT, A.; GNANSOUNOU, E. Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. **International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 14, p.144-159, 2009.

PARDO, Y.; SÁNCHEZ, E.; KAFAROV, V. Life cycle assessment of third generation biofuels production. **Chemical Engineering Transactions.** n. 21, p. 1177-1182, 2010.

PERES, J. R. R.; BELTRÃO, N. E. de M. Oleaginosas para biodiesel: situação atual e potencial. In: BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **O futuro da indústria: biodiesel.** Brasília: MDIC-STI/IEL. p. 67-82. 2006.

POSTEN, C.; SCHAUB, G.; Microalgae and terrestrial biomass as source for fuels – a process view. **J. Biotechnol.** n. 142 p. 64-69. 2009

POWELL, N.; SHILTON, A. N.; PRATT, S.; CHISTI, Y. Factors influencing luxury uptake of phosphorus by microalgae in waste stabilization ponds. **Environmental Science and Technology** n. 42, p. 5958–5962, 2008.

RAMIREZ, P. **Análise de Métodos de Alocação Utilizados em Avaliação do Ciclo de Vida.** 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.906p. 2001.

REINHARD, J.; ZAH, R. Global environmental consequences of increased biodiesel consumption in Switzerland: consequential life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, n. 17, p. 46-56, 2009.

RICHMOND, A. **CRC Handbook of Microalgal Mass Culture.** Boca Raton: CRC. 470p. 2004.

SANCHES, E.G.; PANNUTI, C.V.; SEBASTIANI, E.F.. A piscicultura marinha como opção para a carcinicultura brasileira. **Aqüicultura & Pesc.** n. 36, p. 12-19. 2008.

SANDER, K.; MURTHY, G. S. Life cycle analysis of algae biodiesel. **International Journal of Life Cycle Assessment.** n. 15, p. 704-714, 2010.

SCHMIDT, J. H. System delimitation in agricultural consequential LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, n. 13, p. 350-364, 2008.

SCHNEIDER O., SERETI V., EDING E.H., VERRETH J.A.J. Molasses as C source for bacterial heterotrophic production on solid fish waste. **Aquaculture**. n. 261, p. 1239-1248. 2006.

SCOPEL, B. R.; SCHVEITZER, R.; SEIFFERT, W. Q.; PIERRI, V.; ARANTES, R. da F.; VIEIRA, F. do N.; VINATEA, L. A. Substituição da farinha de peixe em dietas para camarões marinhos cultivados em sistema bioflocos. **Pesq. Acropec. Bras.** n. 8, p. 928-934. 2011.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio a Micro e Pequenas Empresas. **Aquicultura e pesca: Camarões – Estudos de Mercado 2008**. Disponível em: <[www.biblioteca.sebrae.com.br](http://www.biblioteca.sebrae.com.br)>. Acesso em: 03 mar 2012.

SINGH, A.; OLSEN, I. O. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. **Applied Energy**. Disponível em: <<http://10.1012/j.apenergy.2010.12.012>>. Acesso em: 23 fev 2011.

SINGH, J.; GU, S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 14, p. 2596-2610. 2010.

SUBHADRA, B.; EDWARDS, M. An integrated renewable energy park approach for algal biofuel production in United States. **Energy Policy**. n. 38, p. 4897-4902, 2010.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 237p., 2008.

VIANNA, F. C. **Análise de ecoeficiência: avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 205 p., 2006.

VON SPERLING, M.; **Lagoas de Estabilização**. Belo Horizonte: UFMG. 123p. 2001.

WIJFFELS, R. H; BARBOSA, M. J. An outlook on algal biofuels. **Science**. n. 5993, p. 796-799. 2010.

ZHU, M.; ZHOU, P. P.; YU, L. J. Extraction of lipids from *Mortierella alpina* and enrichment of arachidonic acid from the fungal lipids. **Bioresource Technology**. n. 84, p. 93-95, 2002.