



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

KÍLVIA DE FREITAS ALVES

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE
NANOCRISTAIS DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DE DENDÊ.

Fortaleza, 2016.

KÍLVIA DE FREITAS ALVES

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE
NANOCRISTAIS DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DE DENDÊ.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota

Fortaleza, 2016.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A479a Alves, Kílvia de Freitas.
Avaliação ambiental dos processos de obtenção de nanocristais de celulose a partir de fibras de dendê /
Kílvia de Freitas Alves. – 2016.
82 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota.
Coorientação: Profa. Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo .
1. Avaliação de ciclo de vida. 2. Impactos ambientais. 3. Nanotecnologia. 4. Desenvolvimento de
produtos. I. Título.

CDD 628

KÍLVIA DE FREITAS ALVES

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE
NANOCRISTAIS DE CELULOSE A PARTIR DE FIBRAS DE DENDÊ.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota

Aprovada em 12 de dezembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Maria Cléa Brito de Figueirêdo (Co-orientadora)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Msc. Nágila Freitas Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos até aqui e pela força em todos os momentos da vida.

Aos meus pais, por serem sempre os maiores incentivadores dos meus estudos e por nunca medirem esforços para me acompanhar e apoiar em todas as minhas conquistas. A vocês, devo absolutamente tudo.

Às minhas irmãs, pela companhia e pelos conselhos, ainda que à distância. Vocês são os meus maiores exemplos.

À Universidade Federal do Ceará pelos conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Ambiental e à EMBRAPA por disponibilizar toda a sua estrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologia da Biomassa (LTB), por sua excelente estrutura e organização e pela incrível equipe que o compõe, em especial a toda a equipe ACV, pelo tempo, conhecimento e paciência voltados à pesquisa.

Aos orientadores, pela experiência transmitida durante o curso e por todo o conhecimento, compreensão, paciência e apoio oferecidos no decorrer da pesquisa, sem os quais seria impossível concluir este trabalho.

Aos amigos que pude conhecer ao longo desses anos e levarei para o resto da vida, pela amizade e pela ajuda em todos os momentos.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o intuito de agregar valor à cadeia do biocombustível, as fibras de dendê apresentam-se como uma fonte em potencial de nanocelulose cristalina (NCC), que tem propriedades físico-químicas promissoras para aplicação em novos materiais. Portanto, o objetivo desse trabalho é avaliar os impactos ambientais da obtenção de 1g de NCC, em escala laboratorial, a partir das fibras da prensagem do mesocarpo de dendê (FPMD) por meio de dois macroprocessos diferentes: 1 - pré-tratamento com polpação acetosolv e 2 – pré-tratamento com polpação etanosolv. O estudo foi realizado com base na Avaliação do Ciclo de Vida, conforme as normas ISO 14041 e 14044. O método utilizado foi o ReCiPe Midpoint hierárquico para avaliar as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, acidificação do solo, depleção hídrica, toxicidade humana e eutrofização marinha e de água doce. As etapas de obtenção de NCC a partir do dendê abrangidas neste estudo são os processos de moagem, peneiramento, explosão a vapor, polpação acetosolv (ácido acético catalisado com ácido clorídrico) ou etanosolv (álcool etílico catalisado com hidróxido de sódio), branqueamento com peróxido de hidrogênio, hidrólise com ácido sulfúrico, centrifugação/ultrassonicação e diálise. Observou-se que na obtenção de NCC por meio do processo 1 (com polpação acetosolv), o processo unitário mais impactante ambientalmente para eutrofização de água doce e toxicidade humana foi o de branqueamento, devido ao consumo de energia e uso de peróxido de hidrogênio, respectivamente. Para a eutrofização marinha, a etapa mais impactante foi o fracionamento do dendê, devido às práticas de cultivo do mesmo. Com relação às mudanças climáticas, o processo mais impactante foi a centrifugação por conta do consumo elevado de energia, para a acidificação terrestre foi a hidrólise pelo uso de ácido sulfúrico e para a depleção hídrica, a diálise devido ao consumo elevado de água. Na obtenção de NCC pelo processo 2 (com polpação etanosolv), o processo unitário mais impactante ambientalmente para todas as seis categorias avaliadas foi o de branqueamento, devido ao consumo elevado de energia, água e reagentes. Foram comparados os dois macroprocessos e observou-se que a obtenção de NCC pelo processo 2 (com polpação etanosolv) é mais impactante para o meio ambiente que pelo processo 1 (com polpação acetosolv). O processo unitário de polpação acetosolv em si é muito agressivo, mas também muito eficiente de modo que a etapa de branqueamento posterior pode ser realizada em condições mais brandas sem comprometer a qualidade do produto final, reduzindo os impactos ambientais associados ao macroprocesso. Já a polpação etanosolv é um processo mais brando, porém menos eficiente, de modo que o branqueamento pós-etanosolv deve ser muito mais longo e severo que o branqueamento pós-acetosolv para garantir um produto de qualidade semelhante, aumentando os impactos ambientais associados ao macroprocesso. Conclui-se que a obtenção de NCC por meio do processo 1 (com polpação acetosolv) é menos impactante para o meio ambiente que por meio do processo 2 (com polpação etanosolv).

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida, impactos ambientais, nanotecnologia, desenvolvimento de produtos, polpação, acetosolv, etanosolv.

ABSTRACT

In order to add value to the biofuel chain, palm fiber represents a potential source of crystalline nanocellulose (NCC), which has physicochemical properties that are very promising for application in new materials. The purpose of this study is to assess the environmental impacts of obtaining 1g of NCC, in laboratory scale, from palm pressed fiber by two different macroprocesses: 1 - pre-treatment with acetosolv pulping and 2 – pre-treatment with ethanosolv pulping. The study was conducted based on the ISO 14041 and 14044 approach for Life Cycle Assessment (LCA), using ReCiPe Hierarchist Midpoint for the following impact categories: climatic changes, terrestrial acidification, water depletion, human toxicity and freshwater and marine eutrophication. The production of NCC palm oil covers the processes of grinding, sieving, steam blasting, acetosolv pulping (acetic acid catalyzed with hydrochloric acid) or ethanosolv pulping (ethyl alcohol catalyzed with sodium hydroxide), bleaching with hydrogen peroxide, hydrolysis with sulfuric acid, centrifugation/ultrasound and dialysis. It was observed that in obtaining NCC by process 1 (with acetosolv pulping), the most environmentally impacting single process for freshwater eutrophication and human toxicity was bleaching, due to the energy consumption and use of hydrogen peroxide, respectively. For marine eutrophication, the palm cracking was the most significant step due to cultivation process. Regarding climatic changes, the most striking process was the centrifugation due to the high energy consumption, for terrestrial acidification was the hydrolysis by the use of sulfuric acid and for water depletion, the dialysis due to its high consumption of water. In obtaining NCC by process 2 (with ethanosolv pulping), the most environmentally impacting single process for all six assessed categories was bleaching due to the high energy and water demand and reagent consumption. The comparison of both macroprocesses reveals that obtaining NCC by the ethanosolv pulping method (process 2) is more impacting for all assessed categories than the same process carried out with acetosolv pulping (process 1). The acetosolv pulping is a quite strong process but also a very efficient one, so the subsequent steps can be carried out in tender conditions without compromising the quality of the final NCC obtained, reducing its environmental impacts. Meanwhile, ethanosolv pulping is a milder but less efficient process, so post-ethanosolv steps should be much longer and much more severe than post-acetosolv steps to ensure a NCC of similar properties and quality, increasing its environmental impacts. Thus, obtaining NCC by process 1 (with acetosolv pulping) is less harmful to the environment than by process 2 (with ethanosolv pulping).

Keywords: life cycle assessment, environmental impacts, nanotechnology, product development, pulping, acetosolv, ethanosolv.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura esquemática da Avaliação de Ciclo de Vida | 15 |
| Figura 2 – Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida | 19 |
| Figura 3 – Frutos do dendê | 37 |
| Figura 4 – Componentes do dendê | 38 |
| Figura 5 – Estrutura molecular da celulose | 39 |
| Figura 6 – Processo de obtenção de nanocristais de celulose (NCC) a partir da FPMD | 44 |
| Figura 7 – Moinho de facas | 47 |
| Figura 8 – Agitador de peneiras | 47 |
| Figura 9 - Reator de Explosão a Vapor | 48 |
| Figura 10 – Impactos resultantes da obtenção de 1g de NCC – Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 61 |
| Figura 11 – Etapas impactantes na categoria “mudanças climáticas” - Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 62 |
| Figura 12 – Etapas impactantes na categoria “acidificação do solo” - Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 63 |
| Figura 13 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização de água doce” - Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 64 |
| Figura 14 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização marinha” - Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 65 |
| Figura 15 – Etapas impactantes na categoria “toxicidade humana” - Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 66 |
| Figura 16 – Etapas impactantes na categoria “depleção hídrica”- Processo 1 (Polpação Acetosolv) | 67 |
| Figura 17 – Impactos resultantes da obtenção de 1g de NCC – Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 68 |
| Figura 18 – Etapas impactantes na categoria “mudanças climáticas”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)..... | 69 |
| Figura 19 – Etapas impactantes na categoria “acidificação do solo” – Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 70 |
| Figura 20 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização de água doce”- Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização marinha”- Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 72 |
| Figura 22 – Etapas impactantes na categoria “toxicidade humana”- Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 73 |
| Figura 23 – Etapas impactantes na categoria “depleção hídrica”- Processo 2 (Polpação Etanosolv) | 74 |
| Figura 24 – Comparação entre Processos 1 e 2 (Polpação Acetosolv e Polpação Etanosolv) | 75 |
| Figura 25 – Análise de erro entre os Processo 1 e 2 (Polpação Acetosolv e Polpação Etanosolv) | 76 |
| Figura 26 – Comparação entre os Processos 1 e Freitas (2016) | 77 |
| Figura 27 – Análise de erro entre Processos 1 e Freitas (2016) | 78 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Fatores de caracterização para depleção de recursos naturais | 22 |
| Tabela 2 – Fatores de caracterização para oxidantes fotoquímicos | 23 |
| Tabela 3 – Substâncias e potencial de acidificação do solo | 24 |
| Tabela 4 – Substâncias relacionadas à eutrofização | 25 |
| Tabela 5 – Fatores de caracterização para depleção da camada de ozônio | 26 |
| Tabela 6 – Fatores de caracterização para mudanças climáticas | 27 |
| Tabela 7 – Modelos de caracterização recomendados pelo ILCD para as categorias de impacto ambiental | 28 |
| Tabela 8 – Incerteza básica de acordo com o tipo de dado | 31 |
| Tabela 9 – Pontuação dos indicadores | 33 |
| Tabela 10 – Composição percentual de 1000g de cachos de dendê | 38 |
| Tabela 11 – Dados secundários | 45 |
| Tabela 12 – Composição percentual de 1000g de cachos de dendê | 52 |
| Tabela 13 – Processo de prensagem do mesocarpo | 53 |
| Tabela 14 – Alocação mássica processo acetosolv | 53 |
| Tabela 15 – Alocação mássica processo etanosolv | 53 |
| Tabela 16 – Inventário processo de obtenção de NCC – Polpação Acetosolv | 55 |
| Tabela 17 – Inventário processo de obtenção de NCC – Polpação Etanosolv | 58 |
| Tabela 18 – Diferenças nos processos de obtenção de NCC | 76 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAPALMA – Associação Brasileira de Produtores de Óleo de Palma

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AE – Acumulação em Excesso

CCl_4 – Tetracloreto de carbono

CFC – Clorofluorcarbonos

CF_4 – Tetrafluoreto de carbono

CH_3Br – Bromometano

CH_3Cl – Clorometano

CH_4 – Metano

Ce – Consumo Energético

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CO_2 – Dióxido de Carbono

CO_{2eq} – Dióxido de Carbono equivalente

Cpu – Capacidade Utilizada

Cpmáx – Capacidade Máxima

CTU – Unidades de Tóxicos Comparativas

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FPMD – Fibras da Prensagem do Mesocarpo do Dendê

FT – Fósforo Total

HCFC – Hidroclorofluorcarbonos

HCl – Ácido Clorídrico

HF – Ácido Fluorídrico

HNO_3 – Ácido Nítrico

H_3PO_4 – Ácido

ILCD – Sistema Internacional de Dados do Ciclo de Vida

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

ISO – Organização Internacional para Padronização

MOS – Matéria Orgânica do Solo

N – Nitrogênio

NA – Nitrogênio Amoniacoal

NBR – Norma Brasileira

NCC – Nanocristais de Celulose

NH₃– Amônia

NH₄ – Amônio

NO – Monóxido de Nitrogênio

N₂O – Óxido de dinitrogênio

NO₂– Dióxido de Nitrogênio

NO₃ – Íon nitrato

NO_x – Óxidos de nitrogênio

Óleo_{eqv} – Óleo equivalente

P – Fósforo

PA – Potencial de Acidificação

PAG – Potencia de Aquecimento Global

PDO – Potencial de Depleção do Ozônio

PFOF – Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos

pH – Potencial Hidrogeniônico

PO₄³⁻ – Íon fosfato

PO₄³⁻_{eqv} – Fosfato equivalente

Pot – Potência

PRCO – Potencial de Redução da Camada de Ozônio

SETAC – Sociedade de Toxicologia Ambiental e Química

SF₆ – Hexafluoreto de enxofre

SO₂ – Dióxido de enxofre

SO₂_{eqv} – Dióxido de enxofre equivalente

Tu – Tempo Utilizado

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

UTC – Unidade Tóxica Comparativa

UTCe – Unidade Tóxica Comparativa para ecossistemas

UTCh – Unidade Tóxica Comparativa para humanos

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 Objetivos | 14 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1 Avaliação de ciclo de vida (ACV) | 15 |
| 2.1.1 Definições de objetivo e escopo | 16 |
| 2.1.2 Inventário | 17 |
| 2.1.2.1 Alocação | 18 |
| 2.1.3 Avaliação de impactos | 18 |
| 2.1.3.1 Categorias de impacto | 20 |
| 2.1.4 Interpretação dos resultados | 30 |
| 2.1.4.1 Análise de incerteza | 30 |
| 2.1.5 Avaliação de Ciclo de Vida para nanotecnologia | 35 |
| 2.2 Dendê | 37 |
| 2.2.1 Composição | 37 |
| 2.2.1.1 Celulose | 39 |
| 2.2.1.2 Hemicelulose | 39 |
| 2.2.1.3 Lignina | 40 |
| 2.2.2 Nanocristais de celulose | 40 |
| 2.2.2.1 Obtenção de nanocristais de celulose | 40 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 43 |
| 3.1 Objetivo e escopo do estudo | 43 |
| 3.2 Inventário | 45 |
| 3.2.1 Coleta de dados secundários | 45 |
| 3.2.2 Coleta de dados primários referentes ao pré-tratamento da FPMD.. | 46 |
| 3.2.3 Alocação dos dados | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Avaliação de impactos | 53 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 54 |
| 4.1 Análise de inventário | 54 |
| 4.2. Avaliação de impactos | 61 |
| 4.2.1 Obtenção de nanocristais de celulose - Processo 1 | 61 |
| 4.2.2 Obtenção de nanocristais de celulose - Processo 2 | 67 |
| 4.2.3 Comparação entre os processos 1 e 2 | 74 |
| 4.2.4 Análise de erro | 75 |
| 4.2.5 Comparação entre os processos 1 e 2 e o processo avaliado por Freitas (2016) | 76 |
| 5. CONCLUSÕES | 79 |
| REFERÊNCIAS | 80 |

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões ambientais requer, cada vez mais, modificações no sistema atual de produção industrial, a fim de tornar os processos mais sustentáveis. Para alcançar essa meta, um dos meios é optar pela produção com base em materiais de origem vegetal, como a celulose e a lignina, originadas de várias maneiras, inclusive por meio de resíduos fibrosos da agroindústria.

O uso destas fibras para desenvolvimento de novos produtos pode resultar não somente no aumento da biodegradabilidade dos produtos após sua disposição final, mas também na redução da utilização de recursos não renováveis, além do aumento de valor agregado às fibras vegetais e aos próprios produtos provenientes dos resíduos fibrosos da agroindústria.

As fibras vegetais processadas resultantes do processo de produção do óleo de palma são utilizadas majoritariamente na obtenção de energia na forma de calor. Entretanto, existem outras opções de uso de maior valor agregado para tais fibras.

Um das alternativas é a produção de nanocristais de celulose (NCC) ou nanocelulose a partir das fibras de dendê. Tais produtos possuem as mais diversas aplicações no mercado, como no desenvolvimento de filmes para embalagens para a indústria alimentar, além de suas destinações na indústria farmacêutica, na área médica e na produção de biocompósitos.

O processo de obtenção de nanocristais de celulose (NCC) a partir das fibras de dendê em si também pode se realizar de várias maneiras, variando as condições de pré-tratamento às quais a fibra é submetida. Ainda que os nanocristais obtidos ao fim do processo sejam de características semelhantes, os diversos processos de obtenção geram diversos impactos ambientais e é extremamente relevante determinar qual a condição menos ambientalmente nociva na obtenção de um produto final, sem comprometer sua qualidade.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho ambiental dos processos de obtenção de nanocristais de celulose a partir das fibras de dendê por dois processos diversos: 1 – pré-tratamento com polpação acetosolv e 2 – pré-tratamento com polpação etanosolv, em escala laboratorial, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Os objetivos específicos são:

- Quantificar e comparar os impactos destes dois processos de obtenção de NCC;
- Selecionar o método de menor impacto ambiental associado;
- Identificar os pontos críticos em termos ambientais de ambos os métodos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

Com a crescente sensibilização com relação às causas ecológicas, é cada vez mais frequente a busca por processos e produtos menos agressivos ao meio ambiente. Alternativas que tentam assemelhar os processos industriais a processos naturais são muito bem vistas, atuando como parte do ecossistema e não interferindo no seu funcionamento. Nesse contexto, surge a Ecologia Industrial, que considera prevenir a poluição através da redução do uso de insumos e da geração de rejeitos.

Uma das ferramentas da Ecologia Industrial para quantificar esses consumos e emissões é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que consiste em analisar todas as fases de extração de matéria-prima, produção, uso e descarte de um produto ou processo (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura esquemática da Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: A autora (2016).

Trata-se de uma abordagem completa, que compreende todas as etapas dentro do processo de produção, consumo e descarte final (ou seja, um sistema de produto). A ACV diferencia-se de outras ferramentas por permitir a comparação entre produtos e processos com função semelhante e por possibilitar a identificação de pontos críticos em uma cadeia produtiva. Assim, a ACV permite tirar conclusões e elaborar estratégias para uma produção mais amigável ao meio ambiente, a partir da avaliação de processos alternativos de obtenção de determinado produto ou serviço e seleção do que interfere o mínimo possível no fluxo natural que se dá dentro dos ecossistemas.

2.1.1 Definições de objetivo e escopo

A etapa inicial da ACV consiste na definição dos objetivos do estudo, seu escopo e o estabelecimento da unidade funcional, além de procedimentos que assegurem a qualidade do estudo (CONSOLI *et al.*, 1993). Esta etapa é crucial para o sucesso da avaliação, uma vez que diferentes objetivos requerem diferentes abordagens e vice-versa, ou seja, diferentes abordagens respondem diferentes tipos de perguntas (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

O objetivo deve transmitir de maneira clara a razão da realização do estudo, suas aplicações e o que se pretende atingir com sua realização. Segundo a Norma ISO 14040 “o objetivo de um estudo ACV deve expor de forma não ambígua a aplicação planejada, as razões para levar a cabo o estudo e a audiência pretendida, isto é, a quem irão ser comunicados os resultados do estudo”. Assim, a formulação do objetivo deve ser semelhante à elaboração de uma pergunta, a ser respondida com o estudo realizado (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Por exemplo, o objetivo de um estudo pode ser a identificação de etapas em um sistema de produto que podem receber melhorias ou a comparação entre diferentes produtos que exercem uma mesma função (EEA, 1997).

O escopo deve compreender a definição do sistema a ser estudado. Devem ser contempladas i) a fronteira do sistema de produto; ii) as funções desse sistema e sua unidade funcional, iii) a qualidade necessária dos dados coletados e iv) as categorias de impacto a serem avaliadas. Durante a realização de um estudo ACV é preciso definir os processos unitários que se relacionam ao produto em questão, conectados através de um fluxograma. O conjunto desses processos é que constitui a fronteira do sistema de produto, a ser determinada considerando a delimitação espacial, temporal e tecnológica do estudo.

A fronteira espacial delimita a área onde a informação será coletada, posto que é comum que o ciclo de vida de um produto inclua processos com diferentes localizações. Isso acontece porque muitas vezes os produtos industrializados passam por diversas etapas de produção, sendo a matéria-prima extraída em um local diferente de onde ocorre o beneficiamento (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Com relação à fronteira de tempo, deve ser considerado um limite de tempo para o levantamento dos dados relativos ao estudo, como um período de 5 anos ou o último ciclo produtivo. Falta de dados no intervalo de tempo considerado e urgência na obtenção de resultados podem ser adversidades encontradas no quesito temporal.

A fronteira tecnológica avalia quais tecnologias serão empregadas na produção do produto desejado. É então determinada a viabilidade do estudo de acordo com a disponibilidade de tecnologias, suas limitações e possíveis melhorias, através da escolha de tecnologias mais ambientalmente amigáveis, por exemplo.

Já a função do sistema de produto está relacionada à sua produção ou à finalidade do mesmo ao ser consumido. A quantificação desta função determina a

unidade funcional do produto. Exemplificando a função de produção, tem-se que a função de um sistema produtivo em uma fábrica de bebidas seria “produzir refrigerante” e a unidade funcional seria um determinado volume de refrigerante, como 350 mililitros, que representam o conteúdo de uma lata comercial. Por outro lado, um processo de branqueamento de uma determinada fibra, por exemplo, teria como função do sistema “branquear fibras de dendê” e a unidade funcional seria uma determinada massa de fibra branqueada ao fim do processo, como 1 grama de fibra.

A qualidade requerida dos dados e a profundidade do estudo também são determinadas no escopo. A qualidade dos dados é fundamental para a análise do ciclo de vida de um produto, estando relacionada a checagem dos dados coletados, avaliando se eles estão completos e comparando-os com dados já existentes, caso possível (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Os dados podem ser primários, quando são coletados em campo ou em laboratório, ou secundários, quando são extraídos de bases de dados ou publicações. É importante definir quais processos requerem a coleta de dados primários e quais processos já foram inventariados e podem ser aproveitados no estudo.

Nessa etapa, também devem ser definidos os responsáveis pelo estudo e os interessados nas informações obtidas, tendo em vista as limitações de tempo e recursos (CHEHEBE, 1997). Além disso, devem-se escolher as categorias de impacto a serem consideradas no estudo, a depender do objetivo e do escopo do mesmo.

2.1.2 Inventário

A elaboração do inventário leva em consideração todos os processos unitários do sistema de produto, identificando e quantificando as entradas e saídas de cada um. A inclusão ou não de determinados dados no inventário é decidida considerando sua relevância em termos de balanço de massa e energia, sua importância para o ambiente e sua relação com a unidade funcional.

É necessário coletar dados de natureza quantitativa e qualitativa para a análise adequada do inventário. Dados de natureza quantitativa representam as quantificações das entradas e saídas do sistema, como por exemplo, a quantidade de água utilizada ou volume de efluente produzido e sua carga poluente. Dados de natureza qualitativa referem-se aos equipamentos utilizados, a tecnologia adotada, a descrição dos processos e as metodologias de mensuração.

Os dados obtidos são validados por meio de comparações com outros balanços de massa e energia. Assim é possível identificar dados que venham a diferir significativamente de outros dados obtidos em situações semelhantes e mostrem-se inconsistentes. Portanto a validação tem por fim assegurar a representatividade e relevância dos dados para o uso em questão.

Deve ser feita também a normalização dos valores das entradas e saídas de cada processo com relação à unidade funcional estabelecida. Nesta etapa, deve ser

considerada a cadeia de produção e não apenas o produto, posto que diversos coprodutos podem ser obtidos com um mesmo processo, caracterizando a multifuncionalidade do sistema (BAUMANN; TILLMAN, 2004; CHEHEBE, 1997).

2.1.2.1 Alocação

Para analisar situações de multifuncionalidade, onde existe a geração de subprodutos, utiliza-se a alocação. Desse modo, ao invés de considerar que o produto principal é responsável por todos os impactos ambientais, essa prática consiste em repartir os impactos ambientais gerados entre os produtos e subprodutos, considerando critérios quanto à geração de produtos e coprodutos de um sistema (FRISHKNECHT, 2000).

A alocação requer uma maior compreensão da relação entre produtos e coprodutos com as cargas ambientais, sendo, portanto, complexa e podendo agregar incertezas. Contudo, a não alocação desconsidera os coprodutos e suas cargas ambientais, além de expandir o sistema para incluir os subprocessos (CHEHEBE, 1997; BAUMANN; TILLMAN, 2004).

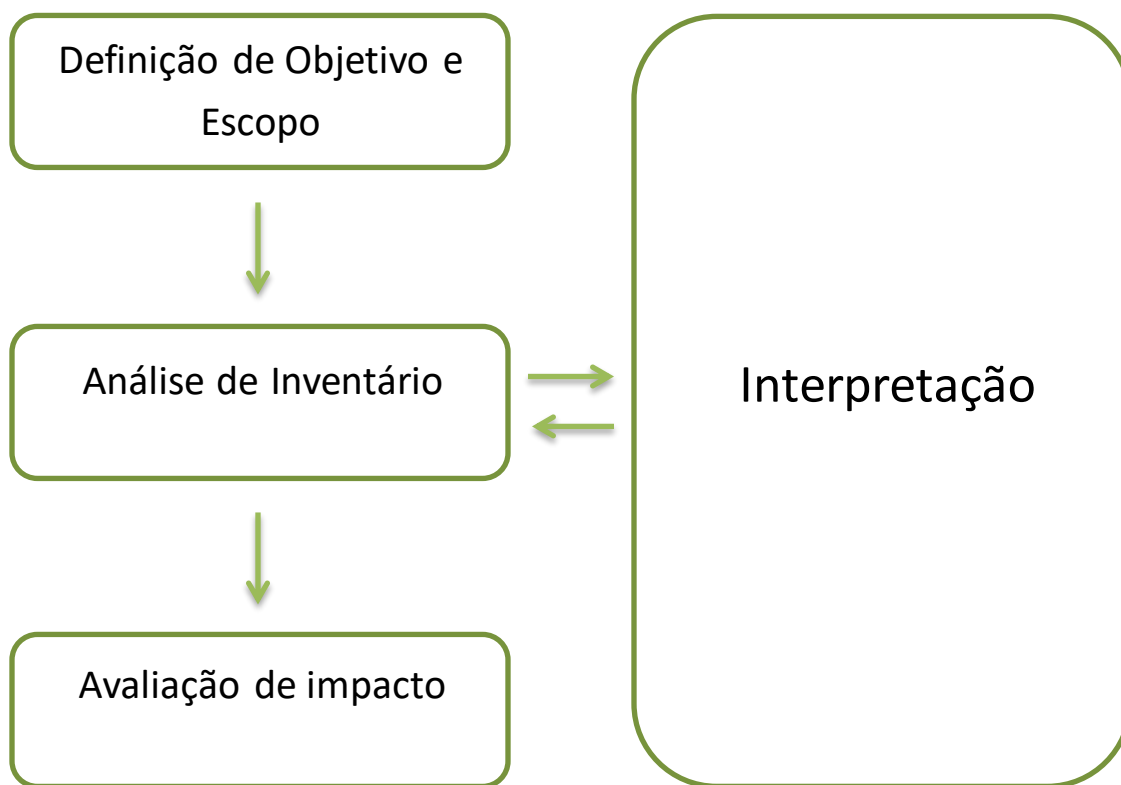
A alocação pode ser realizada utilizando-se critérios físicos, econômicos ou energéticos. A alocação física utiliza propriedades físicas como massa, volume, ou frações molares enquanto a econômica utiliza o valor financeiro (CHEHEBE, 1997; BAUMANN; TILLMAN, 2004). Contudo os sistemas podem apresentar comportamentos não lineares, impossibilitando a análise por meio das proporções apresentadas com a variação das propriedades físicas. Além disso, não necessariamente um coproduto de maior massa ou volume tem maior responsabilidade nas cargas ambientais em um sistema de produto.

Em alternativa, tem-se a alocação econômica que pode ser utilizada quando as relações físicas não justificarem a divisão de cargas entre os produtos. Essa alocação baseia-se no valor econômico dos produtos e coprodutos. Sua aplicação é universal, o que facilita a compreensão da produção de interesse em termos financeiros. Geralmente, os resultados de um estudo ACV são analisados por diretores das empresas que visam primordialmente lucros. Contudo, uma desvantagem desse critério de alocação é a grande variação que os valores de preços atribuídos a um produto podem apresentar, dificultando a definição clara da parcela de cada produto nos lucros da empresa (CHEHEBE, 1997; BAUMANN; TILLMAN, 2004).

2.1.3 Avaliação de impactos

Segundo a ISO 14040 (ISO, 2006), a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida corresponde ao processo qualitativo e quantitativo utilizado na avaliação dos impactos associados ao inventário de um sistema de produto (Figura 2). A AICV é definida pela agregação dos resultados, por vezes ponderados, fornecendo informações sobre os impactos ambientais associados às emissões ao meio e ao consumo de recursos naturais (SONNEMANN; CASTELLS; SCHUHMACHER, 2003).

Figura 2 – Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: A autora (2016).

A avaliação é feita por meio da associação entre os fluxos de materiais e energia e os impactos ambientais. Para avaliar como a emissão de diferentes componentes pode influenciar uma mesma categoria, são utilizados fatores de caracterização.

O fator de caracterização representa a importância de uma substância na ocorrência de um determinado impacto, em relação a uma substância de referência ou equivalente. É calculado por meio de modelos que consideram a cadeia de causa e efeito ambiental relacionada a uma categoria de impacto.

As emissões equivalentes são então obtidas pelo produto da emissão de determinado componente pelo seu fator de caracterização, segundo a equação:

$$\text{Emissão equivalente} = \text{Emissão} \times \text{FC}$$

Desta maneira, é possível somar os valores de emissão de todos os componentes e compará-los entre si.

Para realizar a avaliação de impactos, são então estabelecidas as categorias de impactos relevantes e seus respectivos potenciais de impacto e realizado o cálculo dos indicadores de cada uma das categorias em questão.

De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006), a avaliação de impactos é composta pelas seguintes fases obrigatórias:

- Seleção e definição das categorias de impacto: consiste na escolha das categorias de impactos relevantes para o estudo, de modo a abranger todas as cargas ambientais do sistema. Também são escolhidos os respectivos indicadores e os modelos de caracterização.
- Classificação: etapa qualitativa na qual os resultados do inventário são correlacionados às diferentes categorias de impacto, com base na análise científica dos aspectos ambientais.
- Caracterização: etapa quantitativa onde são calculados os resultados dos indicadores para cada categoria de impacto escolhida por meio da quantificação das contribuições de cada substância para formação de uma categoria de impacto.

Além das fases obrigatórias, existem as fases optativas a seguir:

- Normalização: a etapa de caracterização gera resultados expressos em unidades e medidas diversas, a depender da categoria de impacto analisada. A normalização visa dividi-los por valores de referência, visando à obtenção de uma unidade de medida única.
- Agrupamento: os resultados são separados em grupos, segundo semelhança ou classificação das categorias de impacto. Também pode haver agrupamento em escala global, regional ou local ou devido à alta, média ou pequena gravidade.
- Análise da qualidade: são avaliados os dados com atenção aos valores aproximados e assumidos, visando a posterior avaliação de incerteza dos resultados.

2.1.3.1 Categorias de impacto

Um sistema de produto consome recursos naturais e emite substâncias criando fluxos de causa e efeito com o meio ambiente. A avaliação desses fluxos acontece por meio de indicadores, seja de impacto ambiental intermediário (*midpoint*) ou de dano ambiental (*endpoint*).

As categorias escolhidas devem ser coerentes com o objetivo e escopo do estudo, de modo a representarem realmente os impactos potenciais dos processos produtivos. As categorias dividem-se em 03 grandes grupos: a depleção de recursos naturais, que se refere principalmente aos dados de entrada; a poluição que afeta a saúde humana, referente em especial aos dados de saída; e a degradação de ecossistemas e paisagem, referente também aos dados de saídas (emissões).

A ideia de depleção significa diminuir as reservas de um recurso devido à atividade em questão, reduzindo sua disponibilidade de atuar como entrada no sistema do produto estudado. Também está diretamente atrelado à redução ao acesso a esse

recurso pelas gerações futuras, prejudicando as atividades dependentes do mesmo, além do eventual uso exacerbado de recursos substitutos.

Com relação à depleção dos recursos, estes podem ser classificados como bióticos ou abióticos. As florestas e animais são denominados como recursos bióticos, enquanto a água, combustíveis fósseis, e os minerais são recursos abióticos (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Dessa maneira, a depleção de recursos se subdivide em depleção de recursos bióticos e abióticos.

Os modelos atuais de análise de recursos abióticos baseiam-se nas dimensões das reservas e nas taxas de extração. Avalia-se a quantidade disponível do recurso em questão e com que frequência e em qual quantidade vem sendo extraído de maneira contínua, para fins diversos, por parte das atividades humanas.

Além disso, a tecnologia e o investimento que seriam necessários para extrações futuras do próprio recurso ou de materiais alternativos que o substituam são considerados (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Dessa maneira é possível analisar quão oneroso seria buscar tal recurso em outras fontes menos acessíveis ou seus possíveis substitutos.

O segundo grupo, poluição, agrega inúmeras categorias que afetam primordialmente a saúde humana. Contudo, muitas cargas ambientais podem causar mais de um tipo de impacto, sendo, portanto classificadas como cargas de impactos múltiplos.

Os impactos podem ser paralelos, quando afetam duas ou mais categorias independentes; em série, quando as categorias são afetadas sequencialmente; indiretos, quando os impactos advêm de um fator induzido pela carga; e combinados, quando o impacto é causado por uma combinação de duas ou mais cargas.

As principais categorias de impactos ambientais são:

- Depleção dos recursos naturais (Tabela 1)

Os recursos são caracterizados de acordo com seu tipo como, por exemplo, renováveis ou não renováveis. Os recursos renováveis são aqueles com capacidade de regenerar-se da atividade exploratória em um período de tempo razoável, aceito pela espécie humana (BAUMANN; TILLMAN, 2004). Em contrapartida, os não renováveis são aqueles que não possuem essa capacidade.

As substâncias usadas como referência para a depleção de combustíveis fósseis, por exemplo, são o kg/kg de Óleo_{eqv} da substância equivalente e para a depleção de metais, o kg/ kg de Fe_{eqv}.

Tabela 1 – Fatores de caracterização para depleção de recursos naturais

| Depleção de Metais | Fatores de Caracterização |
|--|---|
| Alumínio | 0,0901 kg/kg Fe _{eqv} |
| Cromo | 24,9 kg/ kg Fe _{eqv} |
| Platina | 163.000 kg/ kg Fe _{eqv} |
| Urânio | 123 kg/kg Fe _{eqv} |
| Ouro | 69.900 kg/kg Fe _{eqv} |
| Depleção Fóssil | Fatores de Caracterização |
| Óleo cru | 1,04 kg/kg Óleo _{eqv} |
| Gás natural (m³) | 0,823 m ³ / kg Óleo _{eqv} |
| Hulha | 0,434 kg/kg Óleo _{eqv} |
| Metano | 1,19 kg/kg Óleo _{eqv} |
| Energia a partir de gás natural | 0,0215 kg/kg Óleo _{eqv} |

Fonte: FRISCHKNECHT (2007).

- Formação foto oxidante (Tabela 2)

Poluentes fotoquímicos são poluentes secundários formados pela reação entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio na presença de luz solar. As concentrações de NO_x (óxidos de nitrogênio) influenciam a produção de ozônio na Troposfera.

A formação foto oxidante é uma espécie de fumaça que reduz a visibilidade e pode acarretar irritações nos olhos e problemas respiratórios, devido à formação de ozônio – prejudicial à saúde humana. A substância de referência utilizada no cálculo do Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (PFOF) é o etileno. Avalia-se o PFOF em comparação com o efeito de 01 kg de etileno (BAUMANN; TILLMAN, 2004; CHEHEBE, 1997).

Tabela 2 – Fatores de caracterização para oxidantes fotoquímicos

| Substância | Elevado NOx PFOF (kg/kg etileno) | Baixo NOx PFOF (kg/kg etileno) |
|-----------------------|---|---|
| Etileno | 1 | 1 |
| CO₂ | 0,027 | 0,04 |
| NO₂ | 0,028 | - |
| NO | - 0,427 | - |
| SO₂ | 0,048 | - |
| Metano | 0,006 | 0,007 |
| Etano | 0,123 | 0,126 |
| Propano | 0,176 | 0,503 |
| n- butano | 0,352 | 0,467 |
| n-pentano | 0,395 | 0,298 |
| Propileno | 1,12 | 0,599 |
| Benzeno | 0,218 | 0,402 |
| Tolueno | 0,637 | 0,470 |
| Metanol | 0,14 | 0,213 |
| Etanol | 0,399 | 0,225 |
| Acetona | 0,094 | 0,124 |
| Formaldeído | 0,519 | 0,261 |

Fonte: Adaptado de BAUMANN; TILLMAN (2004).

- Acidificação terrestre

É um processo causado por substâncias como ácido clorídrico, óxidos de enxofre, dióxido de enxofre e amônia. Tais poluentes são capazes de formar o íon hidrogênio, principal indicador na caracterização do Potencial de Acidificação (PA). Esta categoria é medida em relação a 01 kg de dióxido de enxofre, ou seja, esta é a substância de referência (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

A acidificação (Tabela 3) ocorre de acordo com o local de deposição dos poluentes, afetando a água, o solo, as condições climáticas, a cobertura vegetal e outras atividades que estejam envolvidas na geração desses poluentes.

Tabela 3 – Substâncias e potencial de acidificação do solo

| Substância | Potencial de Acidificação (g/ g SO₂_{eqv}) |
|-----------------------|--|
| SO₂ | 1 |
| HCl | 0,88 |
| HF | 1,6 |
| NO_x | 0,7 |
| NH₃ | 1,88 |

Fonte: Adaptado de BAUMANN; TILLMAN (2004).

- Toxicidade Humana e ecotoxicidade

Sofre influência de substâncias como metais pesados, pesticidas e solventes orgânicos, onde cada uma pode causar consequências diversas em caso de contato com o homem ou ecossistemas em geral. Portanto, existe o conceito de toxicidade humana e ecotoxicidade, subdividido em toxicidade terrestre e aquática, essa por sua vez podendo ser marinha ou de água doce.

O método para cálculo potencial de toxicidade para uma substância específica mais indicada atualmente é o USEtox, que dispõe de uma base de dados de mais de 1000 substância para toxicidade humana e 2500 para ecotoxicidade. Esse método expressa os fatores de caracterização em termos de CTUs (Unidades de Tóxicos Comparativas), sendo resultado de um consenso na comunidade científica e recomendado pelo UNEP-SETAC (ROSEMBAUN, 2008).

Algumas substâncias, como compostos metálicos, possuem relações complexas com os seres vivos, processos de degradação particulares e grande variação, ocasionando incerteza nos dados. Por isso é preciso que sejam desenvolvidas técnicas de modelagem específicas que permitam a obtenção de resultados consistentes (KOELLNER *et al.*, 2013; ILCD HANDBOOK, 2011).

- Eutrofização

O aumento da disponibilidade de nutrientes, em especial fósforo e nitrogênio, a degradação de matéria orgânica e o aumento da temperatura da água podem ocasionar o aumento de consumo de oxigênio dissolvido, utilizado pelos microrganismos na degradação da matéria orgânica. A redução do teor de

oxigênio ocorre juntamente com o crescimento da produção de biomassa e sua degradação, ao ponto de a atividade anaeróbia superar a aeróbia, caracterizando o processo de eutrofização.

A ausência de oxigênio gera inúmeras consequências, como a mortandade de peixes e outros animais aquáticos, geração de odores fortes por conta da degradação anaeróbia de matéria orgânica e o aspecto visual impactante do corpo d'água. As algas e macrófitas que se desenvolvem nessa situação podem ainda ser de natureza tóxica, liberando toxinas de difícil remoção (cianotoxinas), ainda que em tratamentos de água de nível terciário.

Diferentes ecossistemas são influenciados por diferentes nutrientes em um processo de eutrofização (Tabela 4). Enquanto o agente limitante da atividade biológica de ecossistemas de água doce é o fósforo, em ambientes marinhos é o nitrogênio. Dessa maneira, para o cálculo dos fatores de caracterização para a eutrofização marinha, a substância de referência é o nitrogênio, enquanto para a eutrofização de água doce, o fósforo (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Tabela 4 – Substâncias relacionadas à eutrofização

| Substância | g/g PO₄³⁻ eqv |
|------------------------------------|--|
| PO₄³⁻ | 1 |
| H₃PO₄ | 0,97 |
| P | 3,06 |
| NO_x | 0,13 |
| NO₂ | 0,13 |
| NH₃ | 0,35 |
| NH₄ | 0,33 |
| NO₃ | 0,1 |
| HNO₃ | 0,1 |
| N | 0,42 |
| COD | 0,022 |

Fonte: Adaptado de BAUMANN; TILLMAN (2004).

- Depleção da camada de ozônio (Tabela 5)

Substâncias como clorofluorcarbonos (CFCs) e halons são capazes de reagir com o ozônio presente na camada de ozônio da troposfera. Essa reação converte

o ozônio em gás oxigênio e reduz sua capacidade de deter a radiação solar ultravioleta.

O Potencial de Redução da Camada de Ozônio (PRCO) é um indicador que calcula o impacto causado por cada substância relevante, tendo como substância de referência o CFC-11. Os fatores de caracterização são contabilizados em relação ao efeito de 01 kg de CFC-11 (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Tabela 5 – Fatores de caracterização para depleção da camada de ozônio

| Substância | DCO_∞ (kg/kg CFC-11) | DCO 10 anos (kg/kg CFC-11) | DCO 25 anos (kg CFC-11/kg) |
|----------------------------------|---|---|---|
| CFC-11 | 1 | 1 | 1 |
| CFC-12 | 0,82 | - | - |
| CFC-113 | 0,90 | 0,56 | 0,59 |
| CFC-114 | 0,85 | - | - |
| HCFC-22 | 0,034 | 0,17 | 0,13 |
| HCFC-123 | 0,012 | 0,19 | 0,07 |
| HCFC-124 | 0,026 | 0,12 | 0,07 |
| Halon 1201 | 1,4 | - | - |
| Halon 1202 | 1,25 | - | - |
| Halon 1301 | 12 | 10,4 | 10,6 |
| Halon 2401 | 0,25 | - | - |
| CCl₄ | 1,2 | 1,25 | 1,22 |
| 1,1,1 tricloroetileno | 0,11 | 0,75 | 0,38 |
| CH₃Br | 0,37 | 5,4 | 1,8 |
| CH₃Cl | 0,02 | - | - |

Fonte: Adaptado de GUINÉE *et al.* (2002).

- Mudanças climáticas (Tabela 6)

O efeito estufa é essencial para a manutenção da vida na Terra. Porém a presença em grande quantidade de gases de efeito estufa (GEE) aumenta a

quantidade de radiação infravermelha retida na atmosfera, aumentando a temperatura média global.

A elevação da temperatura ocasiona uma série de efeitos adversos como o derretimento das calotas polares e, conseqüentemente, o aumento do nível do mar. O dióxido de carbono, o óxido nitroso e o metano são os principais responsáveis por esse efeito.

A medição dos fatores de caracterização se dá em relação ao gás carbônico. Considera-se o Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada gás em relação ao CO₂, sendo os fatores de caracterização expressos em termos de kg/kg de CO₂-equivalente.

Tabela 6 – Fatores de caracterização para mudanças climáticas

| Substância | PAG 20 anos (kg /kg CO₂eq) | PAG 100 anos (kg/kg CO₂eq) | PAG 500 anos (kg/kg CO₂eq) |
|-------------------------------|--|--|--|
| CO₂ | 1 | 1 | 1 |
| CH₄ | 56 | 21 | 6.5 |
| 1,1,1- tricloroetileno | 360 | 110 | 35 |
| CCl₄ | 2.000 | 1.400 | 500 |
| N₂O | 280 | 310 | 170 |
| SF₆ | 16.300 | 23.900 | 34.900 |
| CF₄ | 4.400 | 6.500 | 10.000 |
| CFC – 11 | 5.000 | 4.000 | 1.400 |
| CFC – 12 | 7.900 | 8.500 | 4.200 |
| CFC – 13 | 8.100 | 11.700 | 13.600 |
| CFC – 113 | 5.000 | 5.000 | 2.300 |
| CFC – 114 | 6.900 | 9.300 | 8.300 |
| HCFC – 22 | 4.300 | 1.700 | 520 |
| HCFC – 123 | 300 | 93 | 29 |
| HCFC – 124 | 1.500 | 480 | 150 |

Fonte: Adaptado de BAUMANN; TILLMAN (2004).

- Impactos relacionados ao uso da terra

O solo dispõe de inúmeras funções, como suporte a edificações e fonte de nutrientes para espécies vegetais. Além disso, existem diferentes tipos de solo que reagem de maneira particular aos impactos das atividades humanas, caracterizando a complexidade desta categoria (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Comumente, os fatores analisados para caracterizar o uso do solo são a transformação e ocupação do mesmo que causam efeitos na biodiversidade e nos serviços ecossistêmicos. Um exemplo de serviço ecossistêmico restado pelo solo é sua capacidade produtiva, que pode ser reduzida ou ampliada de acordo com as práticas agrícolas adotadas. Essas alterações podem ser avaliadas considerando a redução da matéria orgânica no solo ao longo do tempo, por exemplo (KOELLNER *et al.*, 2013). A transformação da terra afeta primordialmente características como a permeabilidade, drenagem e compactação, enquanto a área e o tempo requeridos na ocupação são mais atuantes nos serviços ecossistêmicos providos pelo solo, como capacidade produtiva e habitat de animais.

É importante atentar que os impactos provenientes do uso da terra também podem ser positivos. Por exemplo, quando são realizadas intervenções a fim de melhorar a qualidade de determinadas características do solo, como seu potencial produtivo para uma espécie particular.

Na tabela 7 estão listadas as recomendações do Sistema Internacional de Dados de Ciclo de Vida (ILCD, do inglês “International Reference Life Cycle Data System”) para os modelos e fatores de caracterização para várias categorias de impacto. São atribuídas as classificações: I – Recomendado e satisfatório; II – Recomendado, mas necessita melhoramento; e III – Recomendado, mas sua aplicação deve ser feita com cautela (ILCD HANDBOOK, 2011).

Tabela 7 – Modelos de caracterização recomendados pelo ILCD para as categorias de impacto ambiental

| Categoria de Impacto | Modelo padrão recomendado para a Análise de Impactos no Ciclo de Vida | Indicador | Classificação |
|--|--|---------------------------------------|----------------------|
| Mudança climática ou aquecimento Global | Base de dados para 100 anos do IPCC | Potencial de Aquecimento Global (PAG) | I |
| Uso da terra | Modelo baseado em matéria orgânica do solo (MOS) (Milà i Canals <i>et al.</i> , 2007b) | Matéria Orgânica do solo (MOS) | III |
| Depleção da camada | Estado estável do PDO baseado | Potencial de Depleção do | I |

| | | | |
|--|---|---|--------|
| de ozônio | na Organização Meteorológica Mundial (OMM) (1999) | Ozônio (PDO) | |
| Eutrofização terrestre | Acumulação em excesso (Seppälä <i>et al.</i> 2006, Posch <i>et al.</i> , 2008) | Acumulação em Excesso (AE) | II |
| Eutrofização aquática | Modelo EUTREND (Struijs <i>et al.</i> , 2009b) aplicado no ReCiPe | Fração de nutrientes que alcançam o compartimento de água doce final (P) ou compartimento final marinho (N) | II |
| Ecotoxicidade marinha e terrestre | Não há modelos recomendados | - | - |
| Ecotoxicidade de água doce | Modelo USEtox (Rosenbaum <i>et al.</i> , 2008) | Unidade Tóxica Comparativa para ecossistemas (UTCe) | II/III |
| Formação de oxidantes fotoquímicos | LOTOS-EUROS (Van Zelm <i>et al.</i> , 2008) aplicado no ReCiPe | Incremento da concentração de ozônio troposférico | II |
| Acidificação | Acumulação em excesso (Seppälä <i>et al.</i> 2006, Posch <i>et al.</i> , 2008) | Acumulação em Excesso (AE) | II/III |
| Toxicidade humana, efeitos cancerígenos | Modelo USEtox (Rosenbaum <i>et al.</i> , 2008) | Unidade Tóxica Comparativa para humanos (UTCh) | II/III |
| Toxicidade humana, sem efeitos cancerígenos | Modelo USEtox (Rosenbaum <i>et al.</i> , 2008) | Unidade Tóxica Comparativa para humanos (UTCh) | II/III |
| Depleção hídrica | Modelo para o consumo de água aplicado em Swiss Ecoscarcity (Frischknecht <i>et al.</i> , 2008) | A utilização de água relacionada à escassez de água local | III |
| Depleção de recursos minerais, fósseis e renováveis | CML 2002 (Guinée <i>et al.</i> , 2002) | Escassez | II |

Fonte: ILCD HANDBOOK (2011).

2.1.4 Interpretação dos resultados

A etapa de interpretação consiste em avaliar os resultados provenientes das etapas de inventário e avaliação de impactos a fim de tirar conclusões e formular recomendações a respeito do estudo realizado. Esta etapa é fundamental para a identificação de incoerências e resultados inesperados que possam surgir e elaboração de estratégias para contornar tais adversidades, ainda que estas possam acarretar erros e incertezas aos resultados obtidos (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Durante a avaliação, a consistência e integridade dos dados devem ser garantidas. A consistência está ligada à metodologia adotada no estudo e sua conformidade com o objetivo e o escopo definidos, enquanto a integridade se refere à completeza das informações e dados utilizados (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Também existe a análise de sensibilidade na qual os dados de entrada são variados para que sejam avaliadas as consequências dessas modificações nos resultados de avaliação de impactos. Dessa maneira, podem-se enumerar os dados e processos mais críticos, cujas alterações por menores que sejam geram grandes consequências nos resultados.

2.1.4.1 Análise de incerteza

As incertezas referentes aos resultados ocorrem devido à imprecisão dos dados, ou seja, àqueles com alto desvio padrão com relação ao valor médio utilizado; enquanto a variabilidade dos dados se refere às diferentes condições da produção, como variação do local.

A variação nos dados pode ser descrita por uma distribuição, expressa como um intervalo ou desvio padrão. Métodos estatísticos, como as técnicas de Monte Carlo podem ser usadas para lidar com esses tipos de incertezas e calcular a incerteza dos dados em resultados de ACV (GOEDKOOOP *et al*, 2016).

Para calcular o desvio padrão de cada dado a partir de uma amostragem significativa dos dados, no caso de limitação na amostragem, é utilizada a matriz Pedigree.

Originalmente desenvolvida por Weidema (1996), a chamada matriz Pedigree avalia a incerteza básica e a relativa. A incerteza básica é própria de determinadas substâncias e diz respeito à tecnologia disponível para medição, com base no julgamento de especialistas. Por exemplo, os dados de emissão de CO₂ são considerados completamente exatos pelos peritos, de modo que seu fator de incerteza básica é alto (Tabela 8).

Tabela 8 – Incerteza básica de acordo com o tipo de dado

| Grupo de entrada / saída | C (emissões de combustão) | P (emissões do processo) | A (emissões agrícolas) |
|--|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Demanda de: | | | |
| Energia térmica, eletricidade, produtos semi-acabados, material de trabalho, serviços de tratamento de resíduos. | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Serviços de transporte (tkm). | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| Infraestrutura. | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| Recursos: | | | |
| Transportadores de energia primária, metais, sais. | 1,05 | 1,05 | 1,05 |
| Uso do solo, ocupação. | 1,50 | 1,50 | 1,10 |
| Uso do solo, transformação. | 2,00 | 2,00 | 1,20 |
| Emissões de poluentes para a água: | | | |
| DBO, DQO, OD, ODT, compostos inorgânicos (NH ₄ , PO ₄ , NO ₃ , Cl e Na). | | 1,50 | |
| Hidrocarbonetos individuais. | | 3,00 | |
| Metais pesados. | | 5,00 | 1,80 |
| Pesticidas | | | 1,50 |
| PO ₄ e NO ₃ | | | 1,50 |
| Emissões de poluentes para o solo: | | | |
| Óleo, hidrocarbonetos totais. | | 1,50 | |
| Metais pesados. | | 1,50 | 1,50 |
| Pesticidas. | | | 1,45 |
| Emissões poluentes para o ar: | | | |
| CO ₂ | 1,05 | 1,05 | |
| SO ₂ | 1,05 | | |

| | | | |
|--|------|------|------|
| NO_x, N₂O | 1,50 | | 1,40 |
| CH₄, NH₃ | 1,50 | | 1,20 |
| Hidrocarbonetos individuais | 1,50 | 2,00 | |
| Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos | | 3,00 | |
| CO, metais pesados. | | 5,00 | |
| Emissões inorgânicas, outros. | | 1,50 | |

Fonte: Adaptado de GOEDKOOOP *et al* (2016).

Já a incerteza relativa avalia a qualidade dos dados em uso de acordo com os seguintes indicadores, desenvolvidos por Weidema (1996):

- Confiança na fonte

Está relacionada aos métodos de aquisição dos dados relevantes e os procedimentos de verificação utilizados na sua obtenção. São levadas em consideração as repetições realizadas, comparações com outros dados e revisão por outra(s) pessoa(s).

- Completeza

Descreve quão representativos são os dados amostrais em relação ao domínio das variáveis e indica se parte dos dados está em falta.

- Correlação temporal

Indica a relação entre o ano em que os dados utilizados foram coletados e o ano do estudo.

- Correlação geográfica

Indica a relação entre as condições da área geográfica relacionada aos dados obtidos e a área relevante para o estudo.

- Correlação tecnológica

Descreve a correlação entre os processos ou materiais relevantes para o estudo ao nível de tecnologia empregada.

Existe ainda um sexto indicador, o número de amostras, usado em versões anteriores da matriz Pedigree. Alguns softwares, como SimaPro, ainda utilizam este indicador e a recomendação atual é deixá-lo como não especificado e atribuir o valor 01 (GOEDKOOOP *et al*, 2016).

Os indicadores são avaliados com valores quantitativos de 01 a 05, onde 01 representa a melhor situação de qualidade e 05 a pior (Tabela 9):

Tabela 9 – Pontuação dos indicadores

| Pontuação do indicador | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------|---|---|---|---|---|
|------------------------|---|---|---|---|---|

Indicadores que são independentes do estudo no qual os dados são aplicados:

| | | | | | |
|---------------------------|---|--|---|---|---|
| Confiança na fonte | Dados verificados baseados em medidas | Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas | Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas ou informações teóricas | Estimativa qualificada (ex. perito industrial); Dados derivados de informações teóricas | Estimativa não qualificada |
| | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,20 | 1,50 |
| Completeza | Dados representativos de todos os locais relevantes para o aspecto e com período adequado para compensar flutuações normais | Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o aspecto considerado com períodos adequados para compensar flutuações normais | Dados representativos de somente alguns locais (<< 50%) relevantes para o aspecto considerado ou : 50% dos locais mas com períodos curtos | Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado OU alguns locais com períodos curtos | Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais E períodos curtos |
| | 1,00 | 1,02 | 1,05 | 1,10 | 1,20 |

Indicadores relativos as condições naturais de produção e tecnológicas na qual os dados são válidos, e então dependem das metas de qualidade de dados para o estudo no qual os dados são aplicados:

| | | | | | |
|-------------------------------|--|--|--|--|--|
| Correlação Temporal | Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo | Menos de 6 anos de diferença | Menos de 10 anos de diferença | Menos de 15 anos de diferença | Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença |
| | 1,00 | 1,03 | 1,10 | 1,20 | 1,50 |
| Correlação Geográfica | Dados da área em estudo | Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída | Dados de uma área menor que área do estudo, ou de área similar | Dados da área com condições de produção ligeiramente similar | Dados de área desconhecida OU área com muita diferença nas condições de produção |
| | 1,00 | 1,001 | 1,02 | 1,05 | 1,10 |
| Correlação Tecnológica | Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo (i.e. tecnologia idêntica) | Dados de processos e materiais em estudo (i.e. tecnologia), mas de diferentes empresas | Dados de processos ou materiais relacionados mas com mesma tecnologia, OU dados de processos e materiais em estudo mas de diferente tecnologia | Dados de processos ou materiais em estudo mas tecnologias diferentes, OU dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia | Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escala laboratorial de diferente tecnologia |
| | 1,00 | 1,05 | 1,20 | 150 | 2,00 |

Fonte: Adaptado de GOEDKOOOP *et al* (2016).

As incertezas são avaliadas por diferentes indicadores e, a cada um deles, é atribuído um fator de incerteza relacionado à pontuação do indicador. Esse fator é expresso como a contribuição do indicador em questão para a incerteza acumulada em todos os indicadores.

Então em posse da pontuação do indicador, seu fator de incerteza e o fator básico de incerteza, o grau de incerteza (SD) pode ser calculado através da equação:

$$SD_{g95} = \exp \sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_b)]^2}$$

Onde:

U1 = Fator de incerteza do indicador Confiança na Fonte;

U2 = Fator de incerteza do indicador Completeza;

U3 = Fator de incerteza do indicador Correlação Temporal;

U4 = Fator de incerteza do indicador Correlação Geográfica;

U5 = Fator de incerteza do indicador Correlação Tecnológica;

Ub = Fator de incerteza básico.

A Análise de Monte Carlo permite obter o intervalo de incerteza dos resultados da avaliação de impacto. Essa análise requer a definição do tipo de função, o desvio padrão e o valor médio de cada variável de entrada e saída que consta no inventário. São então atribuídos valores aleatórios para cada uma das variáveis em questão em várias simulações. As funções associadas às variáveis podem ser de diversos tipos, como lognormal, normal e triangular, sendo a função lognormal a mais utilizada em estudos ACV. Após diversas simulações, são avaliados os valores médios, máximos e mínimos obtidos para cada categoria (GOEDKOOOP *et al.*, 2013).

A análise de incerteza permite a comparação de produtos e processos com o intuito de verificar a incerteza relativa ao impacto ambiental para cada um deles em relação aos demais. É de especial importância em estudos comparativos de processos e/ou produtos. O nível de confiabilidade dos estudos é que definirá se os resultados são estatisticamente significantes ou não, o que ocorre quando a diferença entre os resultados dos impactos de dois processos ou produtos é superior a 95%.

2.1.5 Avaliação de Ciclo de Vida para nanotecnologia

A Avaliação de Ciclo de Vida é uma ferramenta que pode ser utilizada no desenvolvimento de produtos, permitindo avaliar a viabilidade ambiental, tecnológica e

econômica do processo produtivo. Também podem ser identificados os pontos fortes e fracos, permitindo sugerir e investigar oportunidades de melhoria.

Inúmeras tecnologias em ascensão podem e já tem utilizado a ACV em seu processo de desenvolvimento. Uma delas é a nanotecnologia, cuja indústria está em ascensão por trazer a promessa de desenvolvimento de produtos que equilibram os interesses econômicos e ambientais (SOM *et al.*, 2009; HISCHIER *et al.*, 2012; PATI *et al.*, 2014).

Alguns trabalhos sobre a ACV de nanomateriais em escala laboratorial foram desenvolvidos. Figueirêdo *et al* (2009) desenvolveu um estudo onde foram avaliados os impactos da obtenção de nanocristais de celulose a partir de fibras de coco verde (pré-tratamento, hidrólise ácida, centrifugação e diálise) e de algodão (hidrólise ácida, centrifugação e diálise) utilizando ReCiPe Midpoint nas categorias de demanda energética, mudanças climáticas, depleção hídrica, eutrofização e toxicidade humana, onde as fibras de algodão demonstraram um melhor desempenho ambiental.

Porém algumas dificuldades ainda são encontradas, como as lacunas nos dados disponíveis e pouca disponibilidade de informações sobre a toxicidade dos novos nanomateriais, tanto para consumidores como para trabalhadores que manuseiam direta ou indiretamente os materiais (SOM *et al.*, 2009; HISCHIER *et al.*, 2012)

Em escala industrial, as restrições são ainda maiores, como a dificuldade de dimensionar na escala industrial a partir dos dados obtidos da escala laboratorial. Isto é, nas pesquisas de laboratório, os processos são realizados para obter algumas gramas do produto final, enquanto nas indústrias, a obtenção deve ser de toneladas. Apenas multiplicar os valores não seria adequado, posto que na indústria é possível obter maior rendimento e aproveitamento energético (PATI *et al.*, 2014; HETHERINGTON *et al.*, 2014).

Outras dificuldades enfrentadas são a de obtenção de dados industriais, geralmente mantidos em sigilo pelas empresas, e a confiabilidade e robustez dos dados, que não tem transparência comprovada e podem conter informações tendenciosas e incorretas (GAVANKAR *et al.*, 2012; HETHERINGTON *et al.*, 2014).

Freitas (2016) avaliou o desempenho ambiental da obtenção de nanocristais de celulose a partir da fibra da prensagem do mesocarpo do dendê em escala laboratorial pela rota tecnológica desenvolvida por Souza (2014). A produção de NCC de dendê abrangeu os processos de moagem, polpação acetosolv com ácido acético puro catalisado com ácido clorídrico, branqueamento com peróxido de hidrogênio, hidrólise com ácido sulfúrico, centrifugação e diálise. O método utilizado foi o ReCiPe Midpoint hierárquico para avaliar as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, acidificação do solo, depleção hídrica, toxicidade humana, eutrofização marinha e de água doce.

2.2 Dendê

O dendê (nome científico *Elaeis guineenses*) é o fruto do dendezeiro (Figura 3), uma palmeira de até 15 metros de altura originária das florestas tropicais da África Ocidental e também conhecida como palma-de-guiné e coqueiro-de-dendê. (ABRAPALMA, 2014; POKU,2002). Seu principal produto é o óleo extraído industrialmente da polpa de seu fruto, denominado óleo de dendê ou “palm oil” no mercado internacional. É considerada a oleaginosa mais produtiva que existe (JARDINE *et al.* 2016), superando a soja, a mamona e o girassol.

Figura 3 – Frutos do dendê



Fonte: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br> (2015).

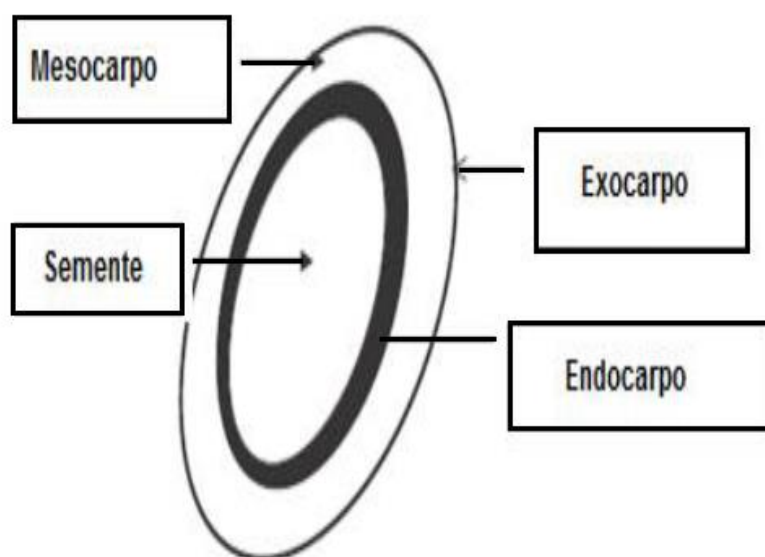
Um hectare de dendê pode render até 05 toneladas de óleo por ano, enquanto a soja pode render 500 quilos e a mamona, 700 quilos (JARDINE *et al.* 2016). Além disso, pode ser utilizado na obtenção de biodiesel, em substituição ou em mistura ao óleo diesel derivado do petróleo. Portanto, a cultura do dendê é, provavelmente, a de maior potencial de crescimento no mundo.

O dendê foi trazido para o Brasil pelos escravos e adaptou-se bem às condições climáticas das regiões Norte e Nordeste do país. Atualmente, o Brasil possui o maior potencial para a produção de óleo de dendê, totalizando 75 milhões de hectares de terras aptas à dendeicultura (JARDINE *et al.* 2016).

2.2.1 Composição

O dendê é composto pelas sementes (amêndoas), envoltas pelo endocarpo, mesocarpo e exocarpo e, mais externamente, as cascas (Figura 4).

Figura 4 – Componentes do dendê



Fonte: AGROPALMA (2007).

Os cachos de dendê contêm os frutos e o engaço, responsável pela sustentação dos frutos. A composição percentual dos componentes para 1000 g de cachos de dendê está explicitada na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 – Composição percentual de 1000g de cachos de dendê

| Produtos | Massa produzida (g) |
|-----------------------------|----------------------------|
| Engaço | 250 |
| Cascas | 71,5 |
| Mesocarpo | 494 |
| Endocarpo e Exocarpo | 41,5 |
| Amêndoas | 143 |
| Cachos de dendê | 1000 |

Fonte: POKU (2002).

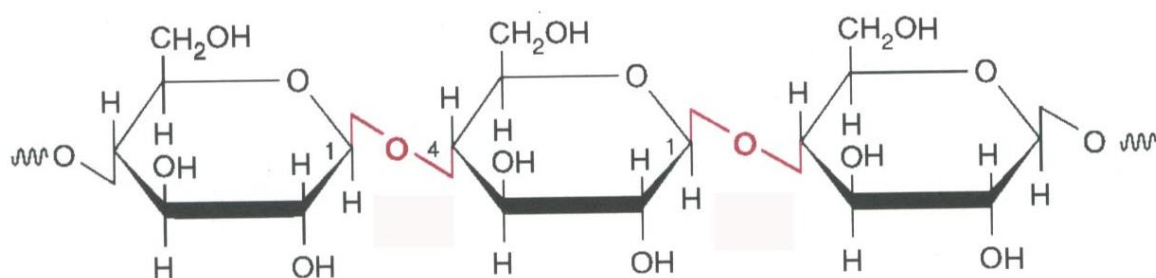
A obtenção do óleo de palma, principal produto do dendê, é realizada através da prensagem da região do mesocarpo. Essa prensagem tem como coproduto, além do óleo, as Fibras da Prensagem do Mesocarpo do Dendê (FPMD) que representam 70% da massa do mesocarpo, enquanto o óleo de palma corresponde a 30% (POKU, 2002).

Por se tratar de um material lignocelulósico, essas fibras contêm componentes como celulose e lignina, encontradas na parede celular vegetal e com grande potencial de aproveitamento na geração de materiais com valor agregado, como os nanocristais de celulose.

2.2.1.1 Celulose

A celulose é o polímero mais abundante encontrado na natureza, sendo componente da parede celular vegetal e de grande importância na economia mundial. É formada por uma cadeia linear composta por moléculas de glucose, repetida em dois anéis de anidrogucose ((C₆H₁₀O₅)_n), no qual o valor de n varia de 10000 a 15000 dependendo da proveniência da celulose. Os anéis são ligados entre si através da ligação β-1,4-glicosídica (Figura 5), que acontece por intermédio de um oxigênio covalente ligado ao carbono 1 (C1) de um anel ao carbono 4 (C4) da glucose do anel adjacente (KLOCK *et al.*, 2005; MOON *et al.* 2011).

Figura 5 – Estrutura molecular da celulose



Fonte: KLEMM *et al.* (2005).

Além de plantas, fungos, algas e invertebrados, algumas bactérias são capazes de produzir celulose formando uma rede estrutural, denominada celulose bacteriana (LAVOINE *et al.* 2012; MOON *et al.* 2011; BROWN JR., 1998).

Inúmeras cadeias de celulose quando empilhadas paralelamente formam fibrilas elementares, que se agregam formando microfibrilas. Dentro dessas fibrilas, existem regiões onde as cadeias de celulose encontram-se arranjadas em estruturas muito ou pouco organizadas, ou seja, regiões cristalinas e amorfas (MOON *et al.* 2011).

2.2.1.2 Hemicelulose

A hemicelulose é uma molécula menor que a celulose, correspondente à associação de cadeias poliméricas de polissacarídeos de baixa massa molecular. Existe uma grande variedade de componentes em sua estrutura, como galactose, manose e outros açúcares (KLOCK *et al.*, 2005; NASCIMENTO, 2014; SOUZA, 2014)..

Assim como a celulose, a hemicelulose está presente na estrutura das células vegetais.

2.2.1.3 Lignina

A lignina é o segundo polímero mais abundante na Terra. Na composição dos vegetais, equivale de 15 a 40% em massa seca, variando de acordo com a estação do ano, a idade da planta e as fibras consideradas, dentre outros fatores (GHAFFAR, 2013).

Também componente da parede celular, a lignina está associada à celulose e à hemicelulose por intermédio de ligações covalentes. Sua principal função é promover a união entre as células que reforçam a parede, conferindo rigidez à sua estrutura. Devido a essa forte interação, a remoção da lignina oferece grande resistência, demandando a realização de pré-tratamentos (MOON *et al.* 2011).

2.2.2 Nanocristais de celulose

Nanocristais de celulose são domínios cristalinos presentes na celulose, com pelo menos uma de suas dimensões inferior a 100 nm. (SILVA *et al.*, 2009; MOON *et al.*, 2011). Podem ser obtidos de diferentes fontes, como tunicados, sisal, palha de trigo, algodão e fibra da prensagem do mesocarpo do dendê.

2.2.2.1 Obtenção de nanocristais de celulose

Em geral, o isolamento de nanocristais de celulose a partir de base celulósica se dá em duas etapas: pré-tratamento e tratamento químico. A fase de pré-tratamento consiste na remoção parcial ou total de materiais da matriz, como a lignina e a hemicelulose, e no isolamento das fibras celulósicas. Já a fase de tratamento da celulose tem o objetivo de remover as regiões amorfas do polímero de celulose, através da hidrólise ácida, seguida ou não por tratamento ultrassônico ou mecânico (BRINCHI *et al.*, 2013; KLEMM *et al.*, 2011).

- Pré-tratamento:

Explosão a vapor

A explosão a vapor é um pré-tratamento eficiente e relativamente simples na separação dos constituintes de materiais lignocelulósicos, representando combinação de ação química e mecânica (NETO, 2014). Neste processo, a biomassa é submetida a um aumento de pressão seguido de súbita descompressão. Os valores de pressão e temperatura são variáveis, assim como o tempo durante o qual a biomassa è submetida ao aumento de pressão. Geralmente, a explosão a vapor é aplicada a temperaturas na faixa de 160 °C–260 °C (correspondendo à pressão de 6,9 bar – 48,3 bar) por vários segundos ou até alguns minutos antes do material ser exposto à pressão atmosférica.

A explosão a promove a ruptura do material lignocelulósico, causando solubilização de hemiceluloses (hidrólise parcial), parcial despolimerização dos componentes da lignina e desagregação (abertura) da matriz lignocelulósica

através da quebra das ligações inter e intramoleculares (CARA et al., 2008; LÓPEZ-LINARES et al., 2015; ROMANÍ et al., 2013).

Polpação

A polpação é um processo de pré-tratamento químico que consiste na exposição da biomassa vegetal, com o objetivo de separar e recuperar a celulose e outros constituintes como lignina e hemicelulose. Os principais tipos de polpação são *kraft*, sulfito e organosolv. (SOUZA, 2014).

Devido às grandes restrições ambientais associadas aos métodos tipo *kraft* e sulfito, uma grande variedade de métodos organosolv, não-convencionais vem sendo explorados e solventes como ácidos orgânicos e álcoois tem sido cada vez mais utilizados (SHUKR *et al.*, 1992). No processo organosolv, a lignina é dissolvida através da hidrólise de ligações do tipo éter, como as ligações α - aril-éter e β - aril-éter da macromolécula de lignina através de solventes orgânicos (SARKANEN, 1990). Entre os principais métodos de polpação organosolv, estão os métodos: i) acetosolv, que utiliza ácido acético como solvente principal; e ii) etanosolv, que utiliza etanol como solvente principal.

Branqueamento

O branqueamento de materiais lignocelulósicos é um pré-tratamento que tem como principal função a remoção de lignina e hemiceluloses com o uso de agentes oxidantes. Os principais agentes oxidantes utilizados são hipocloritos de sódio e cálcio, clorito de sódio, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio e sódio. O branqueamento consiste basicamente na reação dos agentes oxidantes com a lignina, formando compostos solúveis (NETO, 2014).

Os reagentes químicos a base de cloro vem entrando em desuso, devido à formação de compostos de alta toxicidade e elevado consumo de água. Muitos estudos vêm utilizando o peróxido de hidrogênio como agente alvejante na etapa de branqueamento. Nascimento (2014) e Souza (2015) revelaram que branqueamento com agentes oxidantes livres de cloro produziram nanocristais de celulose semelhantes ao branqueamento tradicional à base de cloro.

Com a finalidade de branquear materiais lignocelulósicos, também há a merceirização, um processo que consiste em solubilizar a lignina presente no material lignocelulósico por meio do uso de solução de hidróxido de sódio (ROSA et al, 2010).

- Tratamento químico da celulose:

Hidrólise ácida

A hidrólise é o principal processo de obtenção dos nanocristais de celulose. As regiões amorfas são mais rapidamente hidrolisadas, devido à desorganização de

sua microestrutura, enquanto as regiões cristalinas possuem maior resistência ao ataque ácido (HABIBI *et al.*, 2010; LU *et al.* 2013). Para a obtenção de maior cristalinidade, é necessário controlar atentamente as condições da hidrólise, como tempo de reação, agitação, concentração do ácido e temperatura.

Souza (2014) realizou um estudo com o objetivo de obter e caracterizar nanocelulose de fibras da prensagem do mesocarpo do dendê através de duas rotas diversas de pré-tratamento: a) mercerização seguida de branqueamento e b) polpação acetosolv seguida de branqueamento.

Comparando os dois pré-tratamentos e os processos de obtenção de nanocelulose, Souza (2014) conclui que o pre-tratamento utilizando polpação acetosolv seguida de branqueamento é o mais indicado para obtenção de NCC.

Essa rota tecnológica foi avaliada por Freitas (2016) e foi observado que a maior parcela de impactos ambientais está atrelada ao processo unitário de branqueamento das fibras. Este trabalho, portanto, resulta da necessidade reduzir os impactos ambientais do branqueamento de modo a repensar todas as etapas de pré-tratamento anteriores.

Souza (2016) buscou otimizar o pré-tratamento, encontrando as condições da polpação acetosolv que provem maior remoção de lignina e hemicelulose, utilizando o mínimo de insumos e por um tempo mínimo possível.

Este trabalho avaliou o desempenho ambiental do processo de obtenção de nanocristais de celulose a partir das fibras da prensagem do mesocarpo do dendê pela rota tecnológica desenvolvida por Souza (2016) em comparação com um cenário com polpação etanosolv.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Objetivo e escopo do estudo

O presente estudo foi realizado seguindo os princípios da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), em concordância com as normas ISO 14040 e ISO 14044 (NBR, 2009a, 2009b). Portanto, é necessário primeiramente definir o objetivo e o escopo do estudo.

Os objetivos do estudo são os mesmos definidos anteriormente neste trabalho.

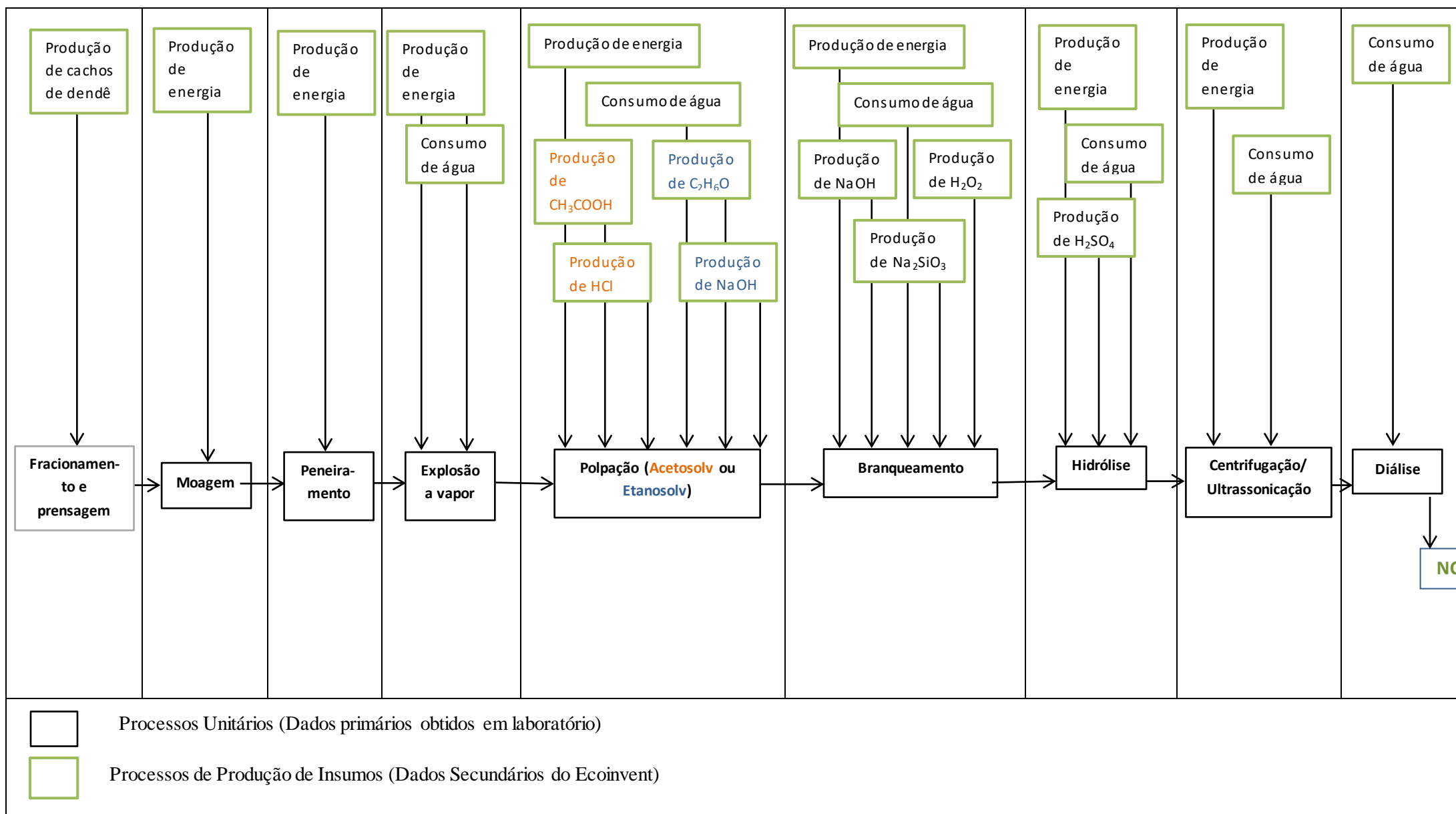
O escopo adotado no estudo foi do berço ao portão, contemplando-se os seguintes processos unitários (Figura 6): moagem da fibra da prensagem do mesocarpo do dendê (FPMD), peneiramento da fibra moída, explosão a vapor da fibra peneirada, polpação acetosolv ou etanosolv da fibra explodida, branqueamento da fibra pós-acetosolv ou pós-etanosolv, hidrólise da fibra branqueada, centrifugação e ultrassonicação da polpa hidrolisada e diálise.

Na obtenção de nanocristais de celulose, todos os processos unitários foram realizados sob as mesmas condições, modificando-se proporcionalmente apenas as quantidades. Apenas a polpação foi realizada de maneiras diferentes (acetosolv ou etanosolv, evidenciadas em cores diferentes) e o branqueamento (foram utilizados os mesmos reagentes, porém em quantidades diferentes como explicitado posteriormente no inventário).

Os processos de produção e fracionamento dos cachos de dendê, além da prensagem do mesocarpo, não foram contemplados neste estudo.

A função em estudo é a obtenção de nanocristais de celulose, seja através da polpação acetosolv ou etanosolv, enquanto a unidade funcional empregada é 01 g de NCC.

Figura 6 - Processo de obtenção de nanocristais de celulose (NCC) a partir da FPMD.



3.2 Inventário

Os dados de entradas e saída referentes ao pré-tratamento das FPMD são primários e foram coletados em experimentos realizados no Laboratório de Tecnologia da Biomassa, na Embrapa (fronteira espacial), em um período de 07 meses (fronteira de tempo), em 2016. Já os dados secundários relativos à produção de dendê, de energia e de reagentes químicos foram obtidos na base de dados Ecoinvent 3.0.

3.2.1 Coleta de dados secundários

O nome dos inventários utilizados do Ecoinvent 3.0 para produção de dendê, energia e produtos químicos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados secundários

| Processos | Referências |
|---|---|
| Produção de dendê | Palm fruit bunches, at farm/MY U |
| Produção de energia | Electricity, high voltage, at grid/BR U |
| Água utilizada | Water, unspecified natural origin BR/m ³ |
| Produção de ácido acético | Acetic acid, 98%, in H ₂ O, at plant/RER U |
| Produção de ácido clorídrico | Hydrochloric acid, 36%, in H ₂ O, from reacting propylene and chlorine, at plant/RER U |
| Produção de hidróxido de sódio | Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant/RER U |
| Produção de álcool etílico | Ethanol, 95%, in H ₂ O, from sugarcane molasses, at sugar refinery/BR U |
| Produção de peróxido de hidrogênio | Hydrogen peroxide, 50% in H ₂ O, at plant/RER U |
| Produção de ácido sulfúrico | Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U |

| | |
|--------------------------------------|--|
| Produção de silicato de sódio | Sodium silicate, solid {RER} sodium silicate production, furnace process, solid product Alloc Def |
|--------------------------------------|--|

Fonte: ecoinvent.org

3.2.2 Coleta de dados primários referentes ao pré-tratamento da FPMD

Foi contabilizado o consumo de água, energia elétrica e reagentes químicos utilizados nos processos de polpação avaliados. As quantidades de água e reagentes foram contabilizadas pelos volumes utilizados, enquanto o consumo de energia elétrica foi calculado de acordo com o tempo de uso, a potência do equipamento e a razão entre a capacidade demandada e a capacidade máxima do equipamento. Tal cálculo é descrito na equação a seguir:

$$C_e = T_u \times P_{ot} \times \frac{C_{pu}}{C_{p\acute{m}ax}}$$

Onde:

C_e: Consumo energético (kWh)

T_u: Tempo utilizado (h)

P_{ot}: Potência (kW)

C_{pu}: Capacidade utilizada (L)

C_{p^ámax}: Capacidade máxima (L)

Os processos unitários realizados para a obtenção de FPMD pré-tratadas foram:

- Separação e moagem: As fibras provenientes da prensagem do mesocarpo do dendê normalmente contêm impurezas, como pequenas pedras e fragmentos de cascas e folhas. As impurezas maiores foram separadas manualmente e, posteriormente, moídas. O moinho utilizado (Figura 7) foi o de facas tipo Willey da marca Fortinox (STAR FT 80). As fibras foram moídas uma vez no moinho superior (4 mm) e uma vez no moinho inferior (0,5 mm). As fibras foram moídas em amostras de, em média, 250 g para não sobrecarregar os moinhos. Para este processo, foram contabilizados tempo de uso e potência do equipamento, além da massa de fibra inicial e a massa de fibra moída obtida ao final desta etapa.

Figura 7 – Moinho de facas



Fonte: A autora (2016).

- Peneiramento: Ainda que haja a separação da fibra, as impurezas não são completamente retiradas e algumas acabam por ser moídas juntamente com as fibras. Para removê-las, é realizado o peneiramento. As fibras, depois de moídas, foram peneiradas em peneiras malha 18 (abertura 1 mm) e malha 35 (abertura 0,500 mm), com o auxílio de um agitador de peneiras (Figura 8) na amplitude 1,5. As fibras foram peneiradas em amostras de, em média, 500 g para não exceder a capacidade das peneiras. Para este processo, foram contabilizados tempo de uso e potência do equipamento, além da massa de fibra inicial e a massa de fibra peneirada obtida ao final desta etapa.

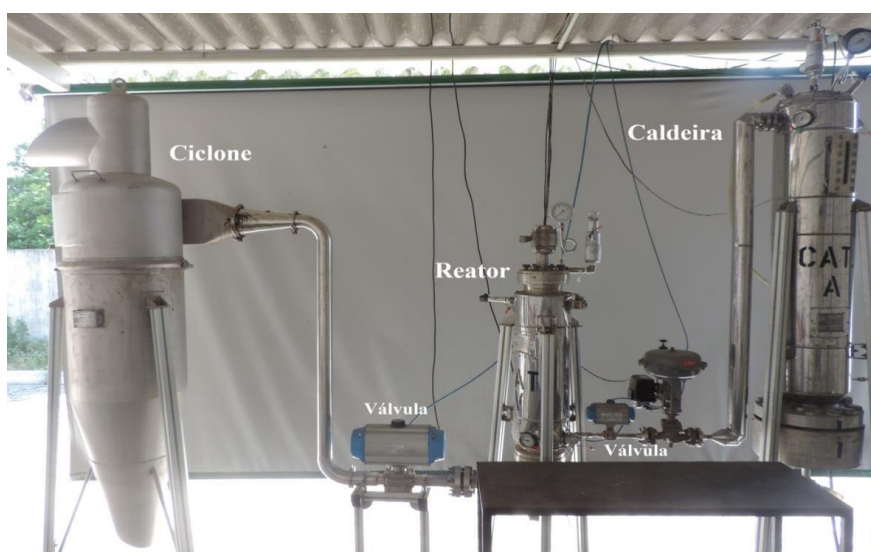
Figura 8 – Agitador de peneiras



Fonte: A autora (2016).

- Explosão a vapor: A explosão a vapor é utilizada para desintegração dos materiais lignocelulósicos. Os ensaios foram realizados no Reator de Explosão a Vapor em escala piloto, fabricado pela Metalúrgica Metalquim LTDA. O sistema é composto pela caldeira, reator e ciclone, além das duas válvulas que controlam a entrada e a saída de vapor (Figura 9). A capacidade máxima da caldeira é de 56 L e a do reator, de 17 L, ambos com pressão máxima de operação de 40 bar. As amostras de 400g de fibra moídas e peneiradas foram submetidas a um tratamento de 210° C por 03 minutos a 12 bar. Para este processo foram contabilizados consumo de água, tempo de uso e potência do equipamento, além da massa de fibra inicial e a massa de fibra explodida obtida ao final desta etapa.

Figura 9 - Reator de Explosão a Vapor



Fonte: NETO (2016).

- Polpação acetosolv: A polpação tem o objetivo de expor a biomassa vegetal a solventes orgânicos, para recuperar celulose. O processo foi realizado por meio da adição à fibra de uma solução acetosolv (ácido acético 92,8% (V:V), ácido clorídrico 0,7% (V:V) e água destilada 6,5% (V:V)) para 20 g de fibra moída, peneirada e explodida, numa relação biomassa/solvente de 1:10 (m:v). A concentração do ácido acético utilizado na solução foi de 80,2% (m:m). Foi utilizado um sistema de refluxo em balão de fundo chato à pressão atmosférica, à temperatura de 115 °C e sob agitação mecânica por um período de 35 minutos. Filtrou-se a vácuo o licor negro resultante da polpação. Para isso, um volume de 150 ml de ácido acético (99,7%, (V:V)) foi aquecido em capela até a temperatura de 80°C. Lavou-se a fração fibrosa do licor com o ácido acético aquecido até que o líquido que desce pelo funil apresentasse coloração incolor, indicando a remoção parcial da lignina na superfície das fibras. O licor negro, rico em lignina, resultante da primeira lavagem, teve o volume contabilizado e foi recolhido. As fibras remanescentes no funil foram lavadas com água

destilada até alcançarem o pH da água utilizada. Em seguida foram levadas para estufa com circulação de ar a 50°C até atingirem peso constante. O licor negro foi concentrado em um evaporador rotativo tipo Rotavapor R-210/215 da marca BUCHI para concentração da lignina e recuperação de 90% solvente (ácido acético). Após concentrado, o licor negro foi lavado com água destilada a 80° C, em uma razão licor/água de 1:10 (V:V) e deixado em repouso por 24 horas para precipitação da lignina. A lignina foi filtrada a vácuo com papel de filtro qualitativo de 8 µm e lavada até alcançarem pH da água utilizada. Em seguida foi levada para estufa com circulação de ar a 50°C até atingir peso constante. Para este processo foram contabilizados consumo de água (recirculação e lavagens) e reagentes químicos, tempo de uso, capacidade e potência do equipamento, além da massa de fibra inicial e a massa de fibra pós-acetosolv e lignina obtidas.

- Polpação etanosolv: O processo foi realizado por meio da adição à fibra de uma solução etanosolv (NaOH 20% (V:V) e álcool etílico 80% (V:V).) para 20 g de fibra moída, peneirada e explodida. A solução de NaOH (98%) foi feita por meio de diluição para uma concentração final de 4,05% (m:V) e foi utilizado álcool etílico 95%. Foi utilizado um sistema de refluxo em balão de fundo chato à pressão atmosférica, à temperatura de 115 °C e sob agitação mecânica por um período de 02 horas. Filtrou-se a vácuo o licor negro resultante da polpação. Para isso, um volume de 200 ml de solução de NaOH (4,05%) e álcool etílico (95%, (V:V).) numa relação de 1:4 (40 ml de NaOH e 160 ml de álcool etílico) foi aquecido em capela até a temperatura de 80°C. Lavou-se a fração fibrosa do licor com o álcool etílico aquecido até que o líquido que desce pelo funil apresentasse coloração incolor, indicando a remoção parcial da lignina na superfície das fibras. O licor negro, rico em lignina, resultante da primeira lavagem, teve o volume contabilizado e foi recolhido. As fibras remanescentes no funil foram lavadas com água destilada até alcançarem o pH da água utilizada. Em seguida foram levadas para estufa com circulação de ar a 50°C até atingirem peso constante. O licor negro foi concentrado em um evaporador rotativo tipo Rotavapor R-210/215 da marca BUCHI para concentração da lignina e recuperação de 90% solvente (álcool etílico). Após concentrado, o licor negro foi lavado com água destilada a 80° C, em uma razão licor/água de 1:10 (V:V) e adicionado 2 ml de ácido clorídrico puro da marca DINÂMICA para precipitação da lignina. A lignina foi deixada em repouso por 24 horas e filtrada a vácuo com papel de filtro qualitativo de 8 µm e lavada até alcançarem pH da água utilizada. Em seguida foi levada para estufa com circulação de ar a 50°C até atingir peso constante. Para este processo foram contabilizados consumo de água (recirculação e lavagens) e reagentes químicos, tempo de uso, capacidade e potência do equipamento, além da massa de fibra inicial e a massa de fibra pós-etanosolv e lignina obtidas.

Após os processos de polpação, houve recuperação do solvente utilizado através de evaporador rotativo tipo Rotavapor R-210/215 da marca BUCHI. A recuperação foi de 90%, de modo que o valor contabilizado no SimaPro equivale a 10% do valor realmente utilizada no laboratório, posto que os 90% restante foram recuperados e continuam disponíveis para uso, de modo a não serem contabilizados como matéria-prima consumida.

- Branqueamento pós-acetosolv: Para o branqueamento de 05 g de fibra pós-acetosolv, foi inicialmente adicionado à fibra 120 ml de água destilada, 60 ml de H_2O_2 35%, 0,6 g de NaOH e 0,6 g de Na_2SiO_3 , estes últimos dissolvidos em água. A solução foi colocada em béquer de vidro em chapa aquecedora a 60 ° C sob agitação mecânica vigorosa por um tempo total de 02 horas e 30 minutos de análise. Após uma hora de reação, contada a partir da adição da fibra pós-acetosolv, adicionou-se mais 60 ml de H_2O_2 35% lentamente e 0,6 g NaOH e 0,6 g de Na_2SiO_3 novamente dissolvidos em 120 ml de água destilada. Foi adicionado um total de 150 ml de água destilada durante a reação para conter a espuma que se forma com a agitação e a adição dos reagentes. A etapa seguinte foi a filtração a vácuo da amostra e posterior lavagem até pH equivalente ao da água de lavagem. Os equipamentos utilizados foram chapa aquecedora, agitador mecânico e bomba a vácuo. Todos os tempos foram contabilizados, assim como as potências dos equipamentos, o volume de água destilada consumido e o volume de efluentes gerados.

- Branqueamento pós-etanosolv: Foram previamente realizadas duas merceirizações com uma solução alcalina de NaOH 2% em proporção de 1:5 (m:V) a temperatura de 80 ° C por 01 hora e 30 minutos cada, com o intuito de branqueá-la e deixar em condições semelhantes à fibra branqueada pós-acetosolv. Para o branqueamento propriamente dito de 05 g de fibra pós-etanosolv, foi inicialmente adicionado à fibra 120 ml de água destilada, 60 ml de H_2O_2 35%, 0,6 g de NaOH e 0,6 g de Na_2SiO_3 , estes últimos dissolvidos em água. A solução foi colocada em béquer de vidro em chapa aquecedora a 60 ° C sob agitação mecânica vigorosa por um tempo total de 03 horas de análise. Após uma hora de reação, contada a partir da adição da fibra pós-etanosolv, adicionou-se mais 60 ml de H_2O_2 35% lentamente e 0,6 g NaOH e 0,6 g de Na_2SiO_3 novamente dissolvidos em 120 ml de água destilada. Foi adicionado um total de 150 ml de água destilada durante a reação para conter a espuma que se forma com a agitação e a adição dos reagentes. A etapa seguinte foi a filtração a vácuo da amostra e posterior lavagem até pH equivalente ao da água de lavagem. Os equipamentos utilizados foram chapa aquecedora, agitador mecânico e bomba a vácuo. Todos os tempos foram contabilizados, assim como as potências dos equipamentos, o volume de água destilada consumido e o volume de efluentes gerados.

- Hidrólise ácida: Para 05 g de fibra branqueada foram utilizados 100 ml de H_2SO_4 na concentração de 62%. (razão 1:20 m:V). A hidrólise foi realizada sob as condições de temperatura de 28 °C e tempo de 70 minutos. A análise foi realizada sob agitação vigorosa. Após os 70 minutos, a agitação foi desligada juntamente com o aquecimento. A reação foi então parada com água deionizada gelada e recolhida. Os equipamentos utilizados foram chapa aquecedora e agitador mecânico.

- Centrifugação e ultrassonicação: A amostra foi então centrifugada em ultracentrífuga refrigerada, marca HITACHI modelo Himac CP-WX, a 13.000 rpm durante 15 minutos a uma temperatura de 20°C. O sobrenadante foi retirado e a nanocelulose precipitada foi lavada com água deionizada gelada e, em seguida, foi ultrassonicado por 02 minutos em um ultrassom de ponteira da marca UNIQUE, com frequência ultrassônica de 20 kHz e potência a 300 W. Esse procedimento pós-hidrólise foi realizado três vezes.

- Diálise: A NCC foi submetida à diálise até que o pH da água de diálise atingisse o pH da água utilizada (aproximadamente 48 horas).

Também são contabilizadas as emissões geradas, através da medição do volume dos efluentes e análises de parâmetros químicos dos mesmos, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO).

- Análise DQO: A análise de DQO foi feita pelo método espectrofotômetro. Para a realização de tais análises, os efluentes provenientes de ambos os processos (acetosolv e etanosolv) foram armazenados a 4 °C para preservar suas características. No momento da análise, determinado volume de ambos os efluentes foi filtrado, para leitura da DQO filtrada, enquanto o volume não filtrado é utilizado na leitura da DQO total. Posteriormente, os efluentes filtrados e não filtrados foram diluídos (o efluente de acetosolv foi diluído de 1:100 e o de etanosolv de 1:50) para permitir a leitura no espectrofotômetro, totalizando quatro amostras diversas – efluente etanosolv 1:50 filtrado, efluente etanosolv 1:50 total, efluente acetosolv 1:100 filtrado e efluente acetosolv 1:100 total. Foram retiradas duas alíquotas de 2,5 ml de água deionizada para ser realizado o branco em duplicata e transferidas para tudo rosqueado de vidro. Foram retiradas duas alíquotas de 2,5 ml de cada uma das amostras diluídas, filtradas e totais, e transferidas para tudo rosqueado de vidro. Foi adicionado 1,5 ml da solução digestora (sulfato de mercúrio 3,3% (m:V), dicromato de potássio 1% (m:V), ácido sulfúrico 16,7% (m:m) e água deionizada 79% (m:m)) e 3,5 ml da solução catalítica (sulfato de prata 0,009% (m:V) e ácido sulfúrico 99,991% (m:m)) a cada um dos tubos rosqueados contendo as amostras e agitados em agitador mecânico tipo vortex. Os tubos foram digeridos por 02 horas em digestora regulada a 150° C, e em seguida foram retirados e deixados em repouso em temperatura ambiente para resfriamento. A absorbância das amostras foi lida em

espectrofotômetro, em comprimento de onda de 600 nm e os valores de contração de DQO foram calculados através da curva padrão, considerando o fator de diluição de cada amostra.

Demais análises, como Nitrogênio e Fósforo Total, não foram realizadas porque a concentração de reagentes utilizada é muito baixa e os resultados obtidos não seriam representativos, influenciando em menos de 1% os impactos associados ao processo.

Mesmo a análise de DQO realizada não contribuiu diretamente para os impactos ambientais avaliados nesse trabalho.

Considerou-se que 10% da massa de solvente utilizada nas polpações é liberada em efluentes líquidos, posto que 90% da massa foi recuperada através da rotaevaporação.

3.2.3 Alocação dos dados

O inventário original para produção agrícola de dendê disponível na base de dadosecoinvent tem como produto final os cachos de dendê. Considerando dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, do inglês Food and Agriculture Organization of the United Nations), o processo foi adaptado e considerado resultante em: engaço, cascas, mesocarpo, endocarpo, exocarpo e amêndoas (Tabela 12). A alocação mássica foi empregada para atribuição de aspectos e impactos a cada um desses produtos

Tabela 12 – Composição percentual de 1000g de cachos de dendê

| Produtos | Massa produzida (g) | Porcentagem de alocação mássica (%) |
|-----------------------------|----------------------------|--|
| Engaço | 250 | 25 |
| Cascas | 71,5 | 7,15 |
| Mesocarpo | 494 | 49,4 |
| Endocarpo e Exocarpo | 41,5 | 4,15 |
| Amêndoas | 143 | 14,3 |
| Cachos de dendê | 1000 | 100 |

Fonte: POKU (2002).

No processo de prensagem do mesocarpo, que resulta na fibra da prensagem do mesocarpo do dendê (FPMD) e no óleo de palma, considerou-se a obtenção desses produtos de forma manual (Tabela 13). Também empregou-se a alocação mássica nesse processo.

Tabela 13 – Processo de prensagem do mesocarpo

| Produtos | Massa produzida (g) | Porcentagem de alocação (%) |
|------------------|---------------------|-----------------------------|
| Óleo | 148,2 | 30 |
| FPMD | 354,8 | 70 |
| Mesocarpo | 494 | 100 |

Fonte: POKU (2002).

Para os processos de polpação acetosolv e etanosolv, também foi realizada a alocação mássica, de acordo com a massa final de fibra após o processo e a densidade do licor negro de lignina resultante (Tabelas 14 e 15).

Tabela 14 – Alocação mássica processo acetosolv

| Produtos | Massa produzida (g) | Porcentagem de alocação (%) |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|
| FPMD pós acetosolv | 5,6381 | 3,4 |
| Licor negro | 159,0359 | 96,6 |

Fonte: A autora (2016).

Tabela 15 – Alocação mássica processo etanosolv

| Produtos | Massa produzida (g) | Porcentagem de alocação (%) |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|
| FPMD pós etanosolv | 15,8988 | 3,7 |
| Licor negro | 507,4254 | 96,3 |

Fonte: A autora (2016).

3.3 Avaliação de impactos

Foi utilizado o método ReCiPe hierárquico de ponto médio (*midpoint*) versão 1.11 (ReCiPe Midpoint (H) V1.11 / Europe Recipe H) para avaliação das categorias de impacto: mudanças climáticas, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, acidificação do solo, toxicidade humana e depleção hídrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de inventário

As entradas e saídas quantificadas no presente trabalho são em função da obtenção de 1g de nanocristais de celulose, seja pelo processo 1 (polpação acetosolv) ou processo 2 (polpação etanosolv) (Tabelas 16 e 17).

No decorrer do pré-tratamento, foram gerados efluentes nos processos de polpação acetosolv e etanosolv. Observa-se que os valores de DQO são bem mais elevados no efluente pós-acetosolv, em comparação ao pós-etanosolv (tabelas 16 e 17). Isto decorre de uma maior remoção de lignina e hemicelulose da FPMD na polpação acetosolv. Quando a fibra é filtrada, após a reação com ácido acético ou álcool, estes componentes de difícil degradação vão para o efluente proveniente do processo, aumentando as cargas de matéria orgânica e inorgânica.

Além disso, estão contidos no licor negro, os resquícios de reagentes que acabaram por não ser consumidos ou recuperados no processo (10%). No caso da polpação acetosolv, existem traços de ácidos orgânicos fortes, como o ácido acético e ácido clorídrico, enquanto no etanosolv, os resquícios são de álcool etílico e hidróxido de sódio em baixa concentração. A demanda química de oxigênio (DQO) é, portanto, maior nos efluentes da polpação acetosolv que na polpação etanosolv.

No processo 1, a polpação acetosolv é o processo unitário que mais consome energia e a diálise, o que mais consome água. Para o processo 2, a polpação etanosolv é o processo unitário que mais consome energia e a diálise, o que mais consome água.

Tabela 16 – Inventário processo de obtenção de NCC – Polpação Acetosolv

| Processo 1 (polpação acetosolv) | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|--------------|------------------|--------------------|---------------|-----------|---------------------------------|-----------|
| Entradas | Moagem | Peneiramento | Explosão a Vapor | Polpação Acetosolv | Branqueamento | Hidrólise | Centrifugação e ultrassonicação | Diálise |
| Ácido acético (g) | | | | 153,5820 | | | | |
| Ácido clorídrico (g) | | | | 0,7909 | | | | |
| Ácido sulfúrico (g) | | | | | | 75,5696 | | |
| Hidróxido de sódio (g) | | | | | 1,7240 | | | |
| Peróxido de hidrogênio (g) | | | | | 69,1138 | | | |
| Silicato de potássio (g) | | | | | 0,1353 | | | |
| Água destilada (ml) | | | 28,8745 | 711,5503 | 439,5688 | 301,1832 | 385,6081 | 7226,9255 |
| Energia (kWh) | 0,0381 | 0,0008 | 0,0017 | 1,2950 | 0,3191 | 0,0137 | 2,1288 | |
| Fibra prensada (g) | 18,9343 | | | | | | | |
| Fibra moída (g) | | 16,6622 | | | | | | |
| Fibra peneirada (g) | | | 15,0647 | | | | | |
| Fibra explodida (g) | | | | 10,0065 | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|--|----------------|
| Licor negro (g) | | | | 159,0359 | | | | |
| Efluentes | Moagem | Peneiramento | Explosão a Vapor | Polpação Acetosolv | Branqueamento | Hidrólise | Centrifugação e ultrassonicação | Diálise |
| DQO Filtrada (mg/L) | | | | 6410,9977 | | | | |
| DQO Total (mg/L) | | | | 9099,0477 | | | | |

Fonte: A autora (2016).

Tabela 17 – Inventário processo de obtenção de NCC – Polpação Etanosolv

| Processo 2 (polpação etanosolv) | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|--|----------------|
| Entradas | Moagem | Peneiramento | Explosão a Vapor | Polpação Etanosolv | Branqueamento | Hidrólise | Centrifugação e ultrassonicação | Díalise |
| Álcool etílico (g) | | | | 375,3558 | | | | |
| Ácido sulfúrico (g) | | | | | | 75,5696 | | |
| Hidróxido de sódio (g) | | | | 14,3574 | 5,743 | | | |
| Peróxido de hidrogênio (g) | | | | | 733,4572 | | | |
| Silicato de potássio (g) | | | | | 0,7177 | | | |
| Água destilada (ml) | | | 66,8757 | 1851,2917 | 3453,7797 | 301,1832 | 385,6081 | 7226,9255 |
| Energia (kWh) | 0,08829 | 0,0018 | 0,0040 | 5,2276 | 2,4692 | 0,0137 | 2,1288 | |
| Fibra prensada (g) | 43,8534 | | | | | | | |
| Fibra moída (g) | | 38,5910 | | | | | | |
| Fibra peneirada (g) | | | 34,8910 | | | | | |
| Fibra explodida (g) | | | | 23,1758 | | | | |
| Fibra pós-etanosolv (g) | | | | | 15,8987 | | | |

| | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|--|----------------|
| Fibra branqueada (g) | | | | | | 2,8539 | | |
| Polpa hidrolisada (ml) | | | | | | | 340,6979 | |
| Solução de nanocristais (ml) | | | | | | | | 82,5934 |
| Saídas | Moagem | Peneiramento | Explosão a Vapor | Polpação Etanosolv | Branqueamento | Hidrólise | Centrifugação e ultrassonicação | Diálise |
| Efluente (ml) | | | | 1390,206546 | | | | |
| Álcool etílico (g) | | | | 37,5356 | | | | |
| Fibra moída (g) | 38,5910 | | | | | | | |
| Fibra peneirada (g) | | 34,8910 | | | | | | |
| Fibra explodida (g) | | | 23,1758 | | | | | |
| Fibra pós-etanosolv (g) | | | | 15,8987 | | | | |
| Fibra branqueada (g) | | | | | 2,8539 | | | |
| Polpa hidrolisada (ml) | | | | | | 340,6979 | | |
| Solução de nanocristais (ml) | | | | | | | 82,5934 | |
| Nanocristais de celulose (g) | | | | | | | | 1 |
| Licor negro (g) | | | | 507,4254 | | | | |

| Efluentes | Moagem | Peneiramento | Explosão a Vapor | Polpação Acetosolv | Branqueamento | Hidrólise | Centrifugação e ultrassonicação | Diálise |
|----------------------------|---------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|--|----------------|
| DQO Filtrada (mg/L) | | | | 92,5084 | | | | |
| DQO Total (mg/L) | | | | 159,0617 | | | | |

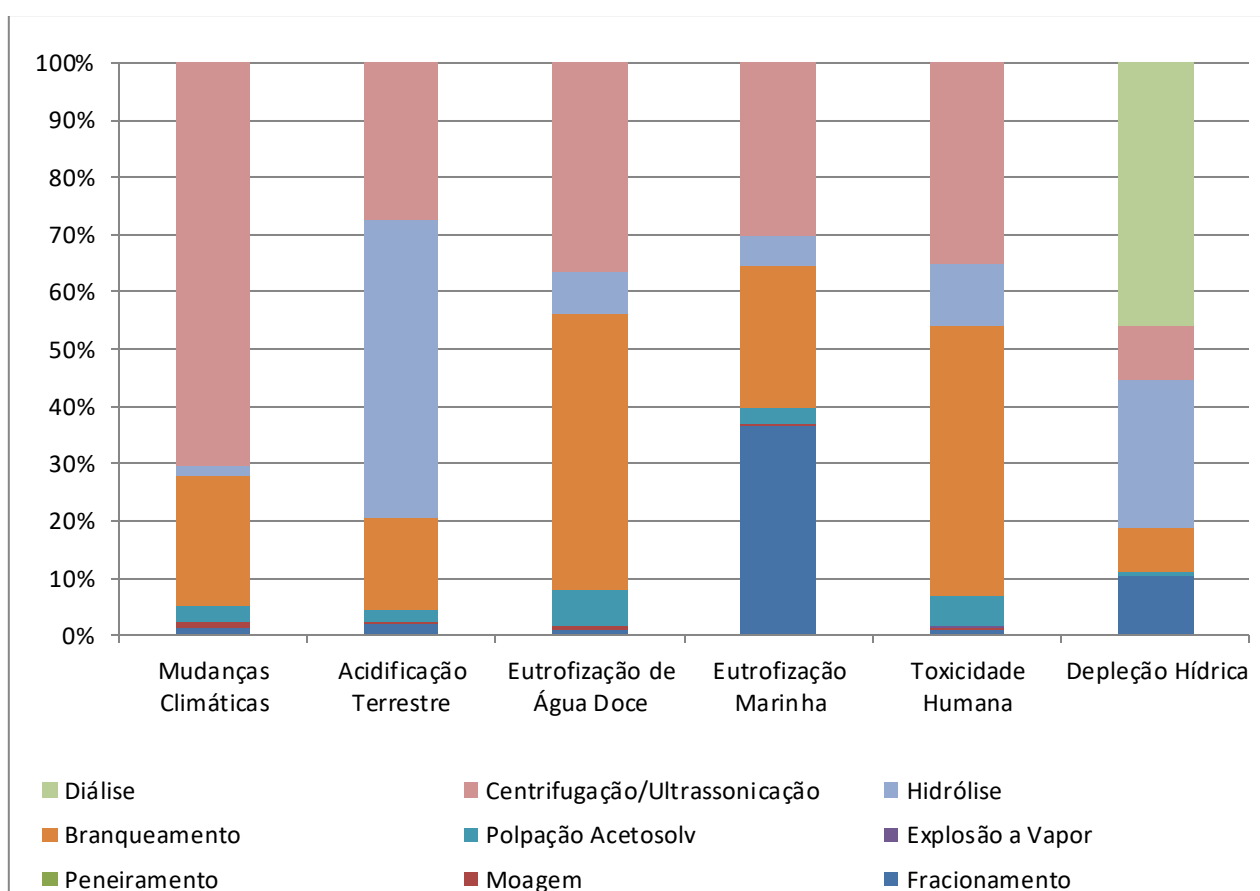
Fonte: A autora (2016).

4.2. Avaliação de impactos

4.2.1 Obtenção de nanocristais de celulose - Processo 1 (polpação acetosolv)

Na obtenção de nanocristais de celulose pelo processo 1 (com polpação acetosolv), o processo unitário branqueamento foi o mais impactante ambientalmente para duas (eutrofização de água doce e toxicidade humana) das seis categorias avaliadas. Com relação às mudanças climáticas, o processo mais impactante foi a centrifugação e para a acidificação terrestre foi a hidrólise (Figura 10). Para a depleção hídrica, a diálise foi o processo mais impactante e para a eutrofização marinha, o fracionamento do dendê.

Figura 10 – Impactos resultantes da obtenção de 1g de NCC – Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

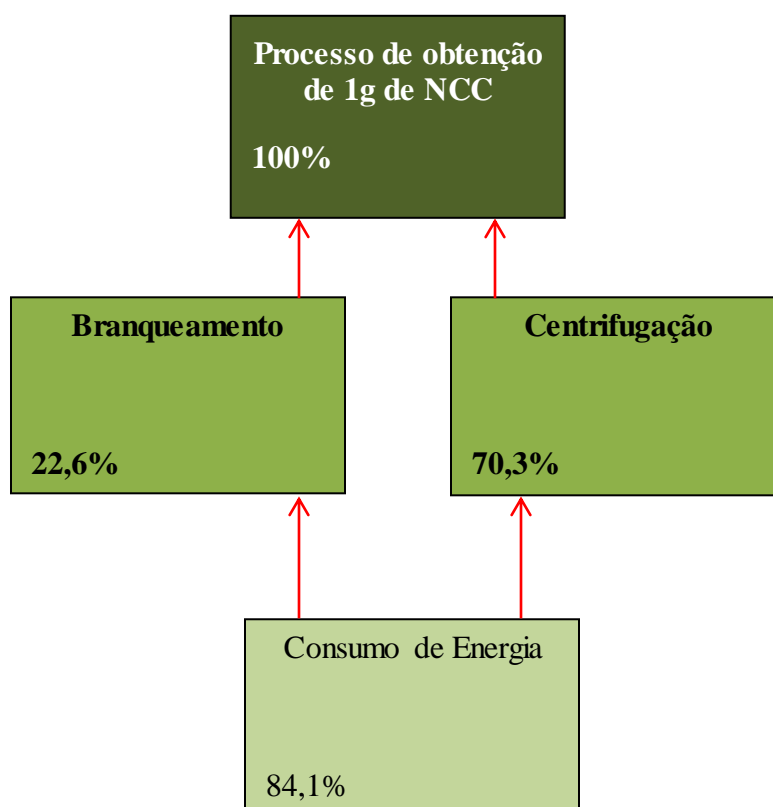
Analisando de maneira mais detalhada cada uma das operações unitárias, podem-se identificar quais dessas etapas foram responsáveis por cada impacto.

- Mudanças Climáticas

No caso das mudanças climáticas, a centrifugação foi o mais impactante (70%) devido ao consumo de energia (Figura 11). O branqueamento também contribuiu (23%) devido ao consumo energético e ao uso de peróxido de hidrogênio.

A produção de energia no Brasil é produto de um mix de diferentes fontes, como a queima de carvão mineral, gás natural e hidroelétricas, entre outras. Para a categoria de mudanças climáticas, a fonte de energia causadora de impacto mais relevante foi a hidrelétrica, por conta das emissões de gases estufa no processo de desmatamento e decomposição da matéria orgânica remanescente nas áreas inundadas.

Figura 11 – Etapas impactantes na categoria “mudanças climáticas” - Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

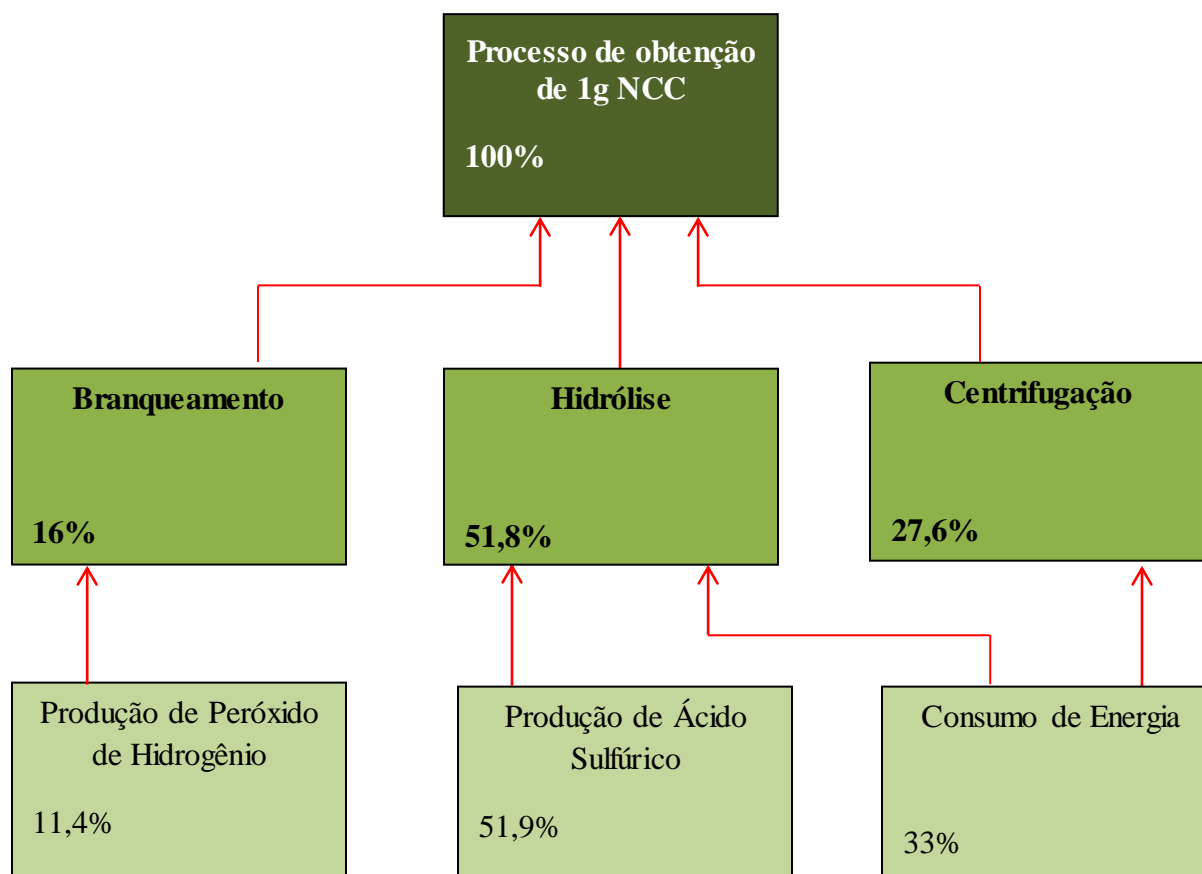
A parcela de 7% restante dos impactos ambientais dentro da categoria de mudanças climáticas foi atribuída aos demais processos unitários.

- Acidificação do Solo

Para a acidificação do solo, tem-se a hidrólise como processo mais impactante (52%) por conta, principalmente, da utilização de ácido sulfúrico (Figura 12). A obtenção de enxofre em refinarias e os eventuais despejos de efluentes do processo têm um grande impacto na acidificação do solo. Além disso, há consumo de energia, proveniente do mix energético da matriz brasileira. Contudo, para esta categoria, diferentemente das mudanças climáticas, a queima de carvão mineral foi o componente que contribui mais significativamente para acidificação.

Houve ainda a contribuição da centrifugação (28 %), também associada ao consumo energético e à queima de carvão. A etapa de branqueamento da fibra polpada também contribuiu (16%), devido à produção do peróxido de hidrogênio, utilizado na reação.

Figura 12 – Etapas impactantes na categoria “acidificação do solo” - Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

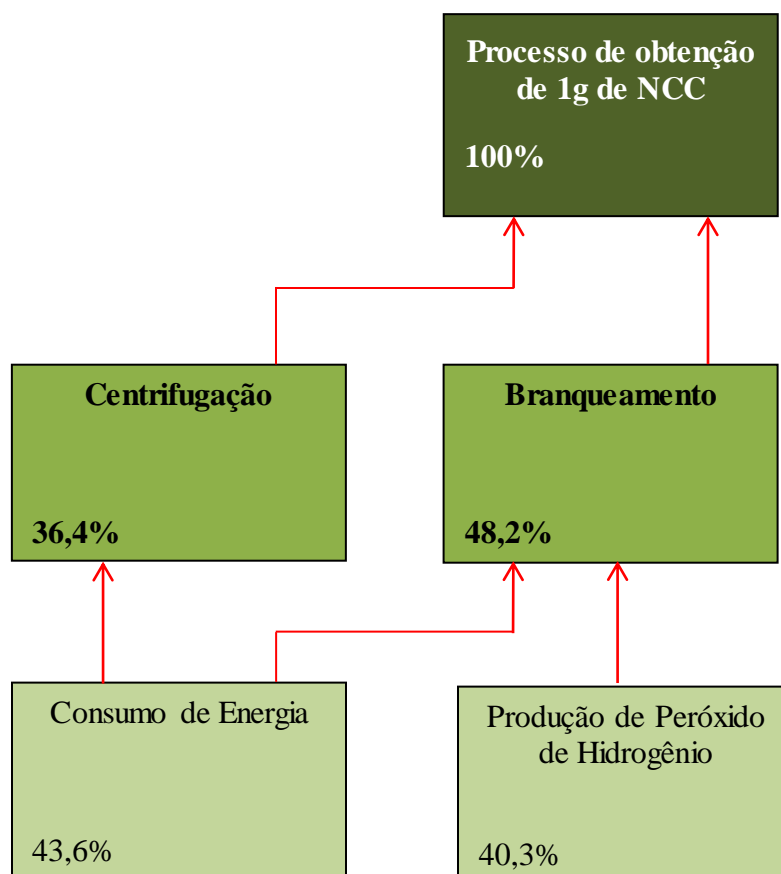
O restante dos impactos para a acidificação do solo (4%) foi atribuído ao carvão mineral utilizado na obtenção de energia nas demais etapas do processo.

- Eutrofização de água doce

Para a eutrofização de água doce, o processo unitário de maior impacto ambiental foi o branqueamento (48%), seguido pela centrifugação (36%) (Figura 13). O consumo energético foi de grande impacto, devido à disposição e descarte de resíduos de minas de carvão e de outros componentes utilizados no processo de obtenção de energia, em especial a lignita, que emite compostos de fósforo. A degradação desses compostos demanda grande atividade aeróbia e consumo de oxigênio dissolvido na água, de modo a reduzir o teor de oxigênio dissolvido e aumentar a produção da biomassa, levando ao processo de eutrofização.

A utilização de peróxido de hidrogênio também impactou na eutrofização de água doce. A disposição e descarte de resíduos de sua produção contribui para o aumento da atividade aeróbia e consumo de oxigênio na degradação dessa matéria orgânica.

Figura 13 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização de água doce” - Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

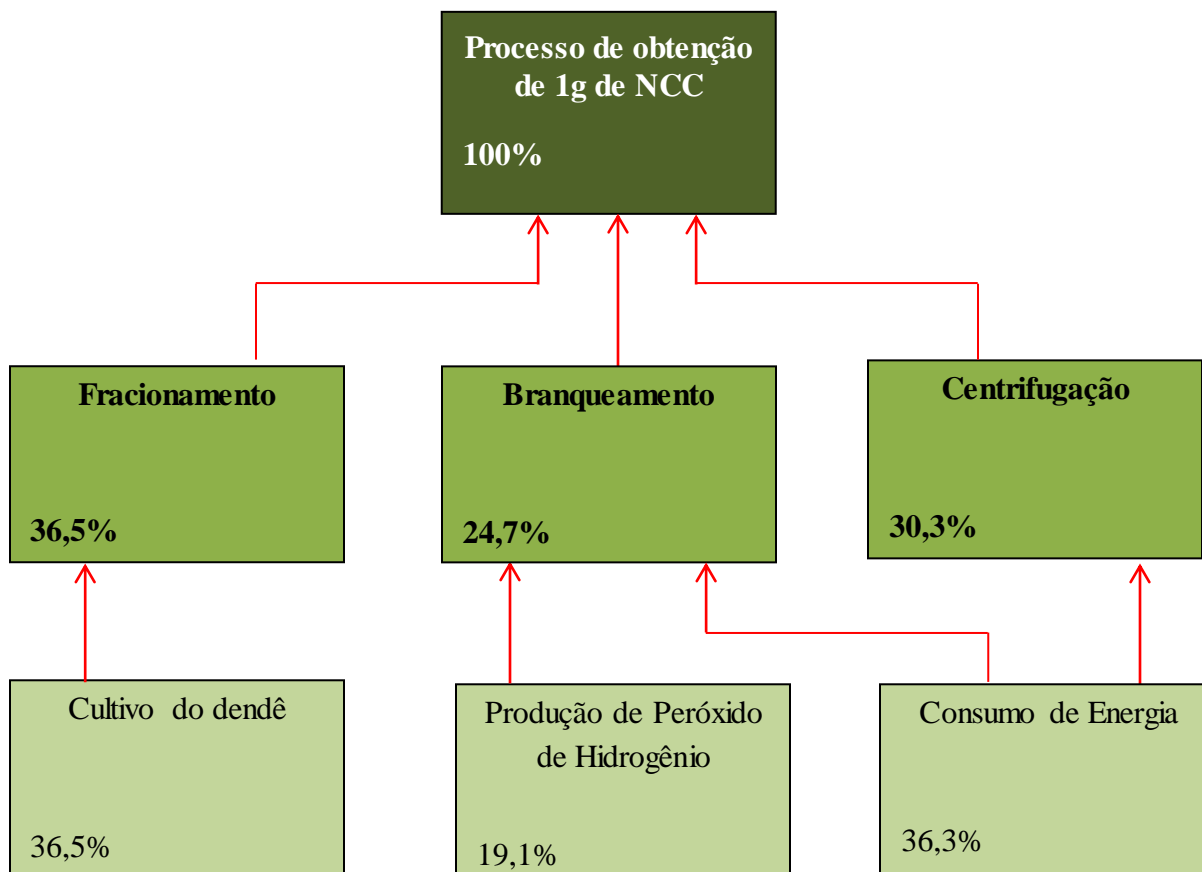
Dos 15,4% restantes de impactos ambientais na eutrofização de água doce, 7,4% foram devido à hidrólise, pelo uso de ácido sulfúrico, e 6,1%, à polpação acetosolv, devido ao ácido acético. Apenas 1,9% foram atribuídos aos demais processos.

- Eutrofização Marinha

Para a eutrofização marinha, o processo mais impactante foi o fracionamento da fibra (37%) devido ao uso de insumos e fertilizantes na produção agrícola do dendê (Figura 14). A centrifugação (30%) e o branqueamento (25%) também contribuíram de maneira significativa por conta do consumo energético. Este consumo está relacionado à disposição e descarte de resíduos de minas de carvão e de outros componentes utilizados no processo de obtenção de energia, em especial a lignita, que emite compostos de fósforo, cuja degradação demanda

grande atividade aeróbia e consumo de oxigênio dissolvido na água, de modo a reduzir o teor de oxigênio dissolvido e aumentar a produção da biomassa, levando ao processo de eutrofização.

Figura 14 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização marinha” - Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

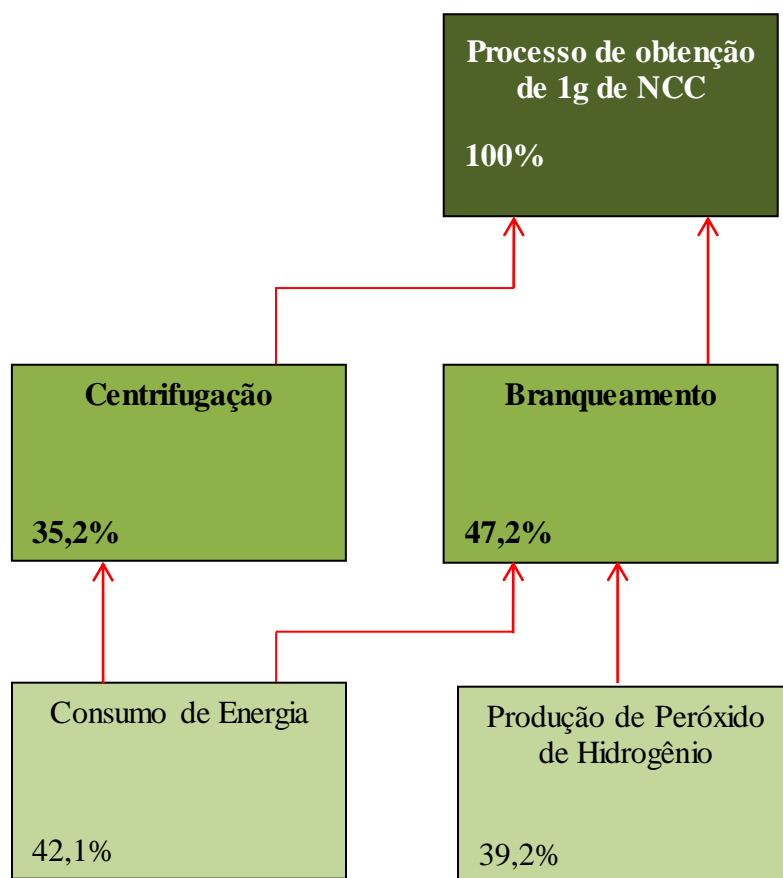
Dos 8,5% restantes de impactos ambientais na eutrofização marinha, a hidrólise (5,2%) teve contribuição devido ao uso de ácido sulfúrico, assim como a polpação acetosolv (2,7%), devido ao ácido acético. Apenas 0,8% foram atribuídos aos demais processos.

- Toxicidade Humana

Na categoria de toxicidade humana, o processo unitário mais impactante foi o branqueamento (47%) (Figura 15). A produção de energia foi mais significativa nesse processo, pelo uso de metais pesados e outras substâncias com potencial tóxico, em especial nos métodos que obtêm energia por meio da queima de carvão.

Também devido ao consumo energético, a centrifugação teve uma grande contribuição (37%) no impacto ambiental na categoria de toxicidade humana. A utilização de peróxido de hidrogênio aumentou o potencial tóxico do processo.

Figura 15 – Etapas impactantes na categoria “toxicidade humana” - Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

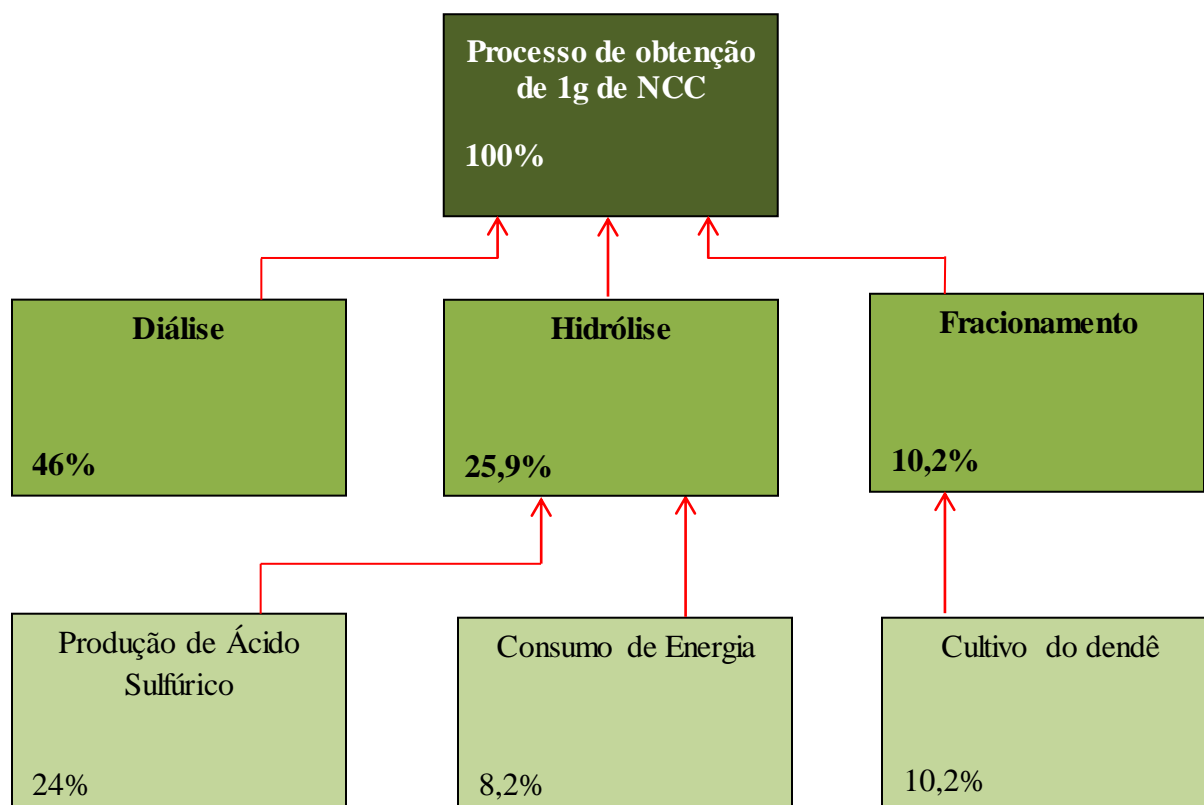
Dos 17,6% restantes de impactos ambientais na toxicidade humana, 10,6% foram devido à hidrólise, pelo uso de ácido sulfúrico e 5,5% à polpação acetosolv, devido ao ácido acético. Apenas 1,5% são atribuídos aos demais processos.

- Depleção Hídrica

A diálise foi o processo mais impactante para depleção hídrica (46%) (Figura 16) pelo uso direto e abundante de água. O processo unitário da hidrólise (26%) também acarretou consumo de água para a obtenção de energia, além da utilização de ácido sulfúrico. O consumo direto de água nessa etapa foi bastante reduzido, em comparação aos volumes utilizados na produção energética, de modo que seus impactos são de menor magnitude.

Para esta categoria, o fracionamento da fibra de dendê também foi impactante (Figura 16). Essa atribuição deveu-se ao grande volume de água utilizado na irrigação do dendêzeiro.

Figura 16 – Etapas impactantes na categoria “depleção hídrica”- Processo 1 (Polpação Acetosolv)



Fonte: A autora (2016).

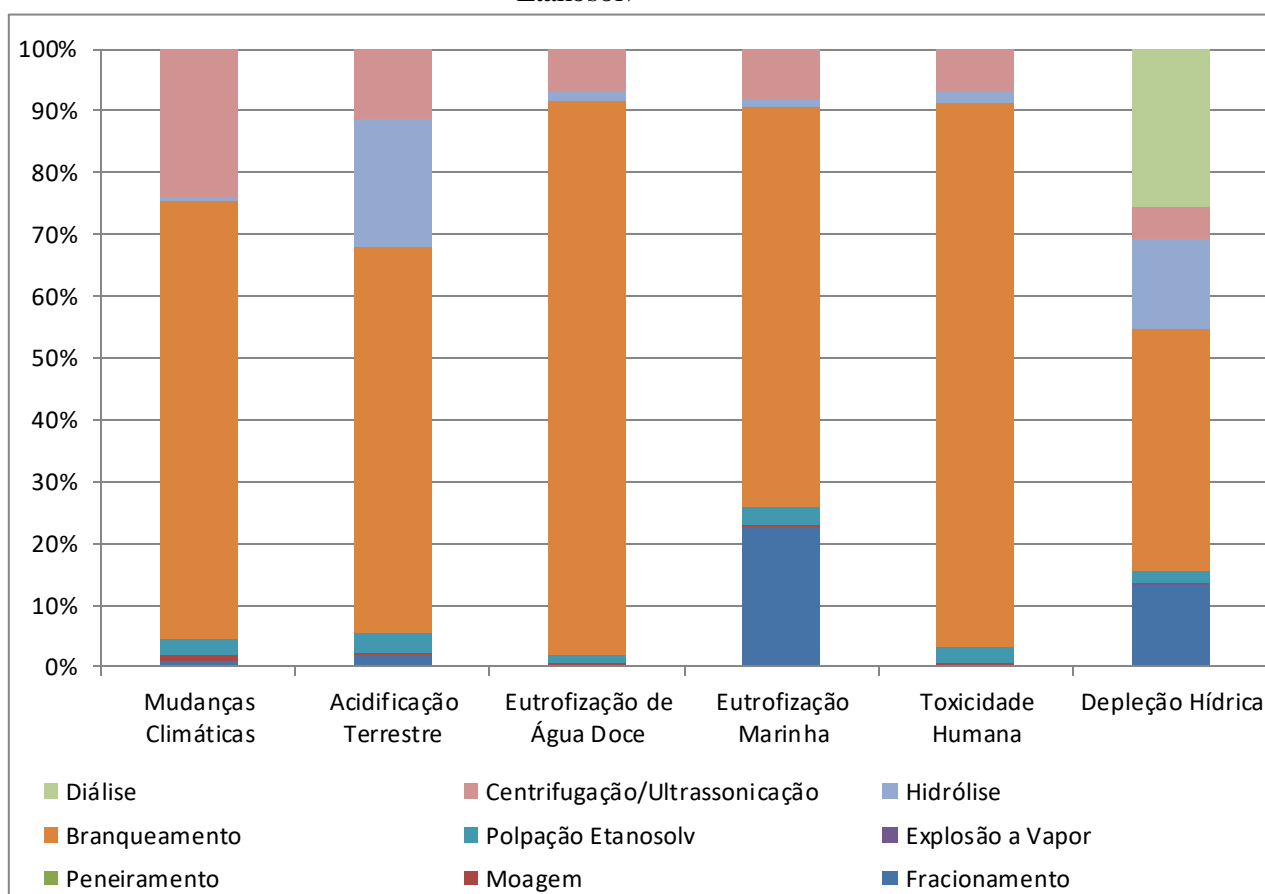
O restante dos impactos na categoria de depleção hídrica (17,9%) foi devido a etapa de centrifugação (9,3%) e branqueamento (7,7%), principalmente. Apenas 0,8% foram atribuídos aos demais processos.

4.2.2 Obtenção de nanocristais de celulose- Processo 2 (Polpação Etanosolv)

Na obtenção de nanocristais de celulose pelo processo 2 (com polpação etanosolv), o processo unitário mais impactante ambientalmente para todas as seis categorias avaliadas foi o de branqueamento (Figura 17).

Analisando de maneira mais detalhada cada uma das operações unitárias, é possível identificar quais etapas geradoras de maior impacto e quais processos, dentro das etapas, são responsáveis por tal impacto.

Figura 17 – Impactos resultantes da obtenção de 1g de NCC – Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

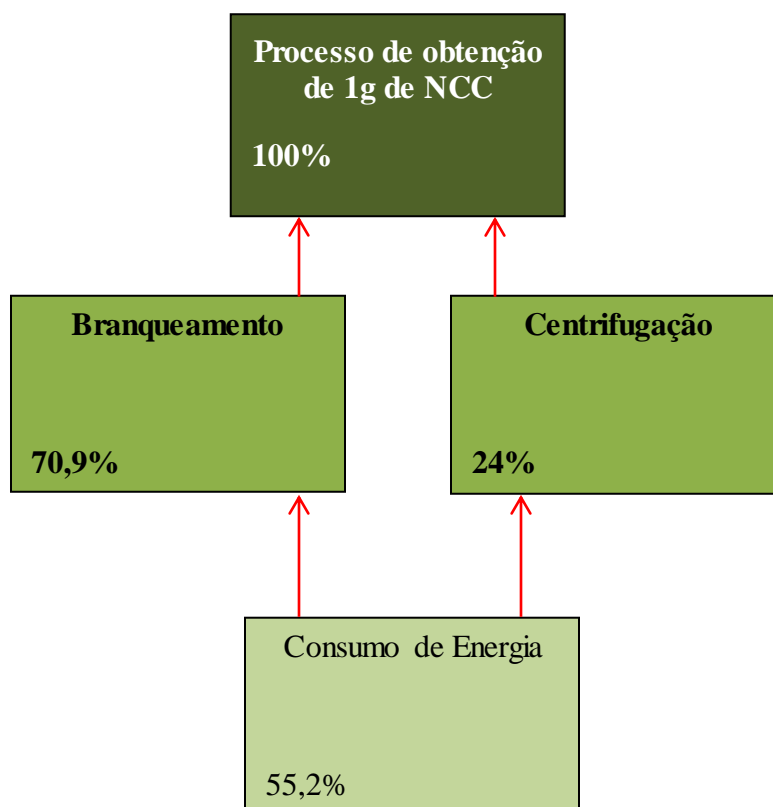
- Mudanças Climáticas

No caso das mudanças climáticas, o processo de branqueamento contribuiu com 71% desse impacto, principalmente, devido ao consumo de energia (Figura 18). Para a categoria de mudanças climáticas, a fonte de energia causadora de impacto mais relevante foi a hidrelétrica, por conta das emissões de GEE no processo de desmatamento e decomposição da matéria orgânica remanescente nas áreas inundadas.

A centrifugação contribuiu com 24% do impacto nas mudanças climáticas, também pela utilização de energia elétrica proveniente de hidroelétricas.

O restante dos impactos na categoria de mudanças climáticas (5,1%) foi atribuído aos demais processos que também utilizam energia.

Figura 18 – Etapas impactantes na categoria “mudanças climáticas”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

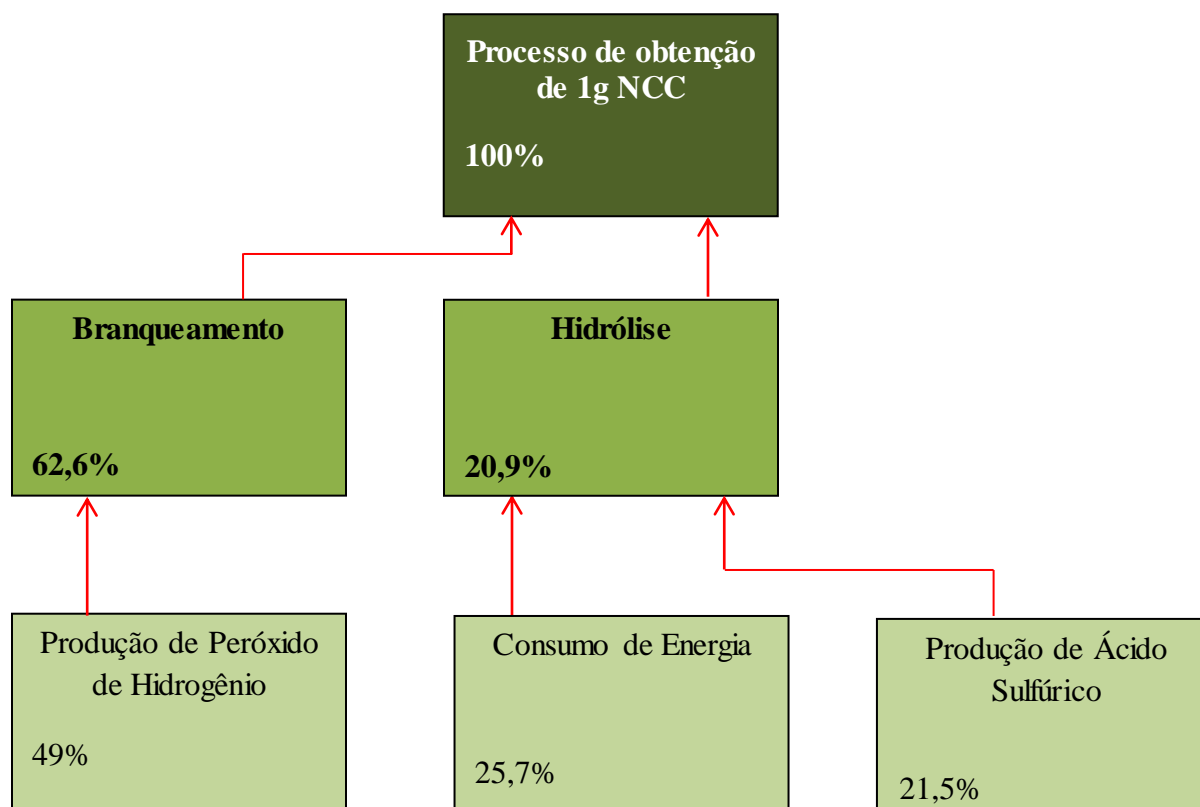
- Acidificação do Solo

A produção de peróxido de hidrogênio utilizado na reação de branqueamento contribuiu com 63% do impacto na acidificação do solo (Figura 19). Outros aspectos que contribuíram para a acidificação do solo foram a queima e disposição de carvão mineral e metais pesados no processo de obtenção de energia termoelétrica.

O processo de hidrólise, por também utilizar energia, causou 21% do impacto na acidificação, devido à produção do carvão mineral e aos metais pesados gerados nessa produção. A utilização de ácido sulfúrico, que requer a extração de enxofre em refinarias, foi outro causador da acidificação do solo.

Os 14% restantes de impactos ambientais na acidificação terrestre foram distribuídas entre os demais processos.

Figura 19 – Etapas impactantes na categoria “acidificação do solo” – Processo 2 (Polpação Etanosolv)



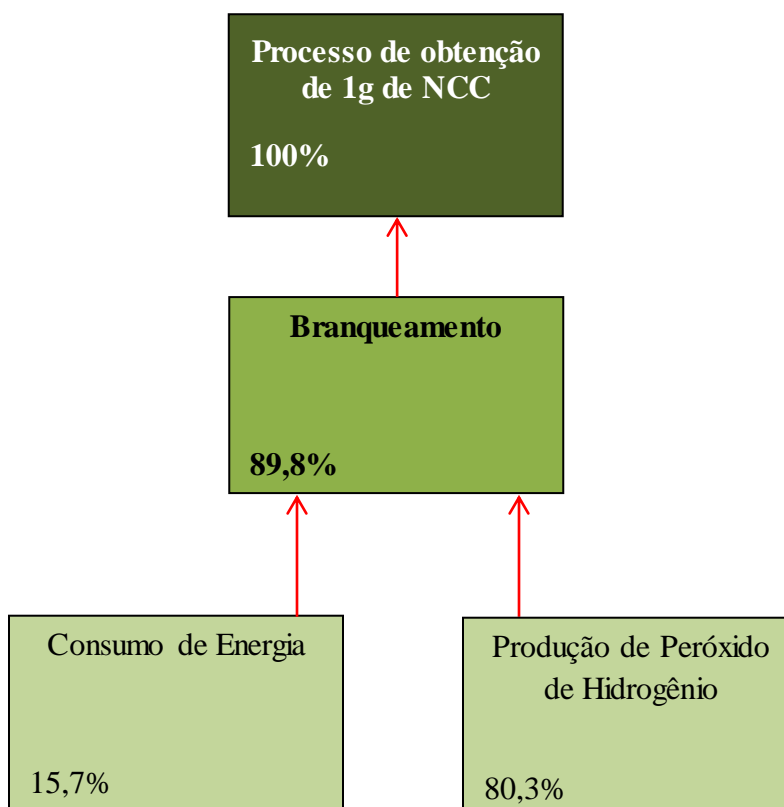
Fonte: A autora (2016).

- Eutrofização de água doce

Para a eutrofização de água doce, o processo unitário de maior impacto ambiental foi o branqueamento que responde por 90% desse impacto (Figura 20), devido ao consumo de peróxido de hidrogênio que gera resíduos orgânicos e inorgânicos que contribuem para o aumento da atividade aeróbia e consumo de oxigênio na degradação da matéria orgânica. O consumo energético no branqueamento respondeu por apenas 16% do impacto na eutrofização.

Os 10,2% restantes de impactos ambientais na eutrofização de água doce foram distribuídos entre os demais processos.

Figura 20 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização de água doce”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

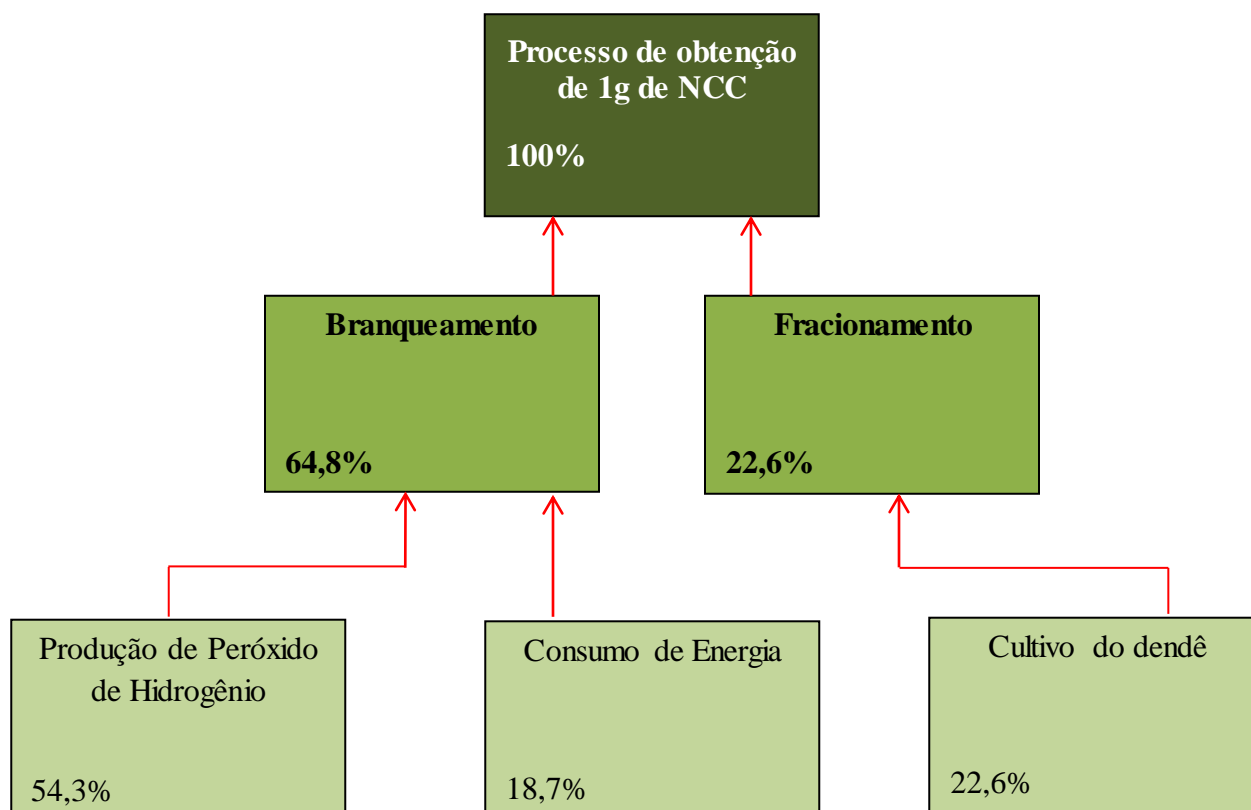
- Eutrofização Marinha

Para a eutrofização marinha, o processo unitário de maior impacto ambiental foi o branqueamento (65%) (Figura 21), devido ao consumo de peróxido de hidrogênio que gera resíduos orgânicos e inorgânicos que contribuem para o aumento da atividade aeróbia e consumo de oxigênio na degradação da matéria orgânica. O consumo energético no branqueamento respondeu por apenas 19% do impacto na eutrofização.

Para esta categoria, outro processo impactante foi o fracionamento da fibra (23%) devido ao uso de insumos e fertilizantes na produção agrícola do dendê.

Os 12,6% restantes de impactos ambientais na eutrofização marinha foram distribuídos entre os demais processos.

Figura 21 – Etapas impactantes na categoria “eutrofização marinha”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

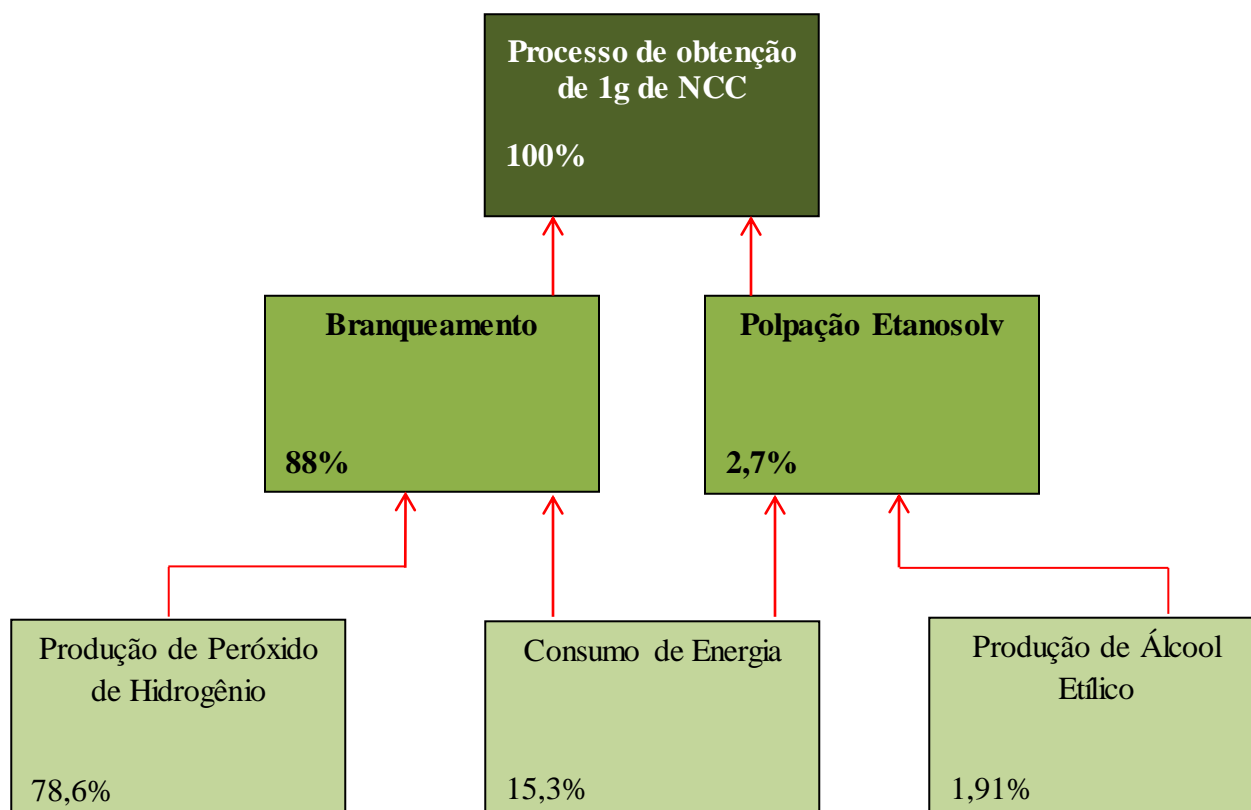
- Toxicidade Humana

Na categoria de toxicidade humana, a produção de peróxido de hidrogênio no branqueamento foi a principal causa desse impacto (Figura 22). A utilização do peróxido de hidrogênio aumentou o potencial tóxico do processo e sua disposição e descarte são responsáveis por uma grande parcela desse impacto.

A produção de energia foi mais significativa, pelo uso de metais pesados e outras substâncias com potencial tóxico, em especial nos métodos que obtêm energia por meio da queima de carvão.

A polpação etanosolv respondeu por apenas 3% da toxicidade humana. O restante dos impactos na categoria de toxicidade humana (9,3%) é devido aos demais processos.

Figura 22 – Etapas impactantes na categoria “toxicidade humana”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

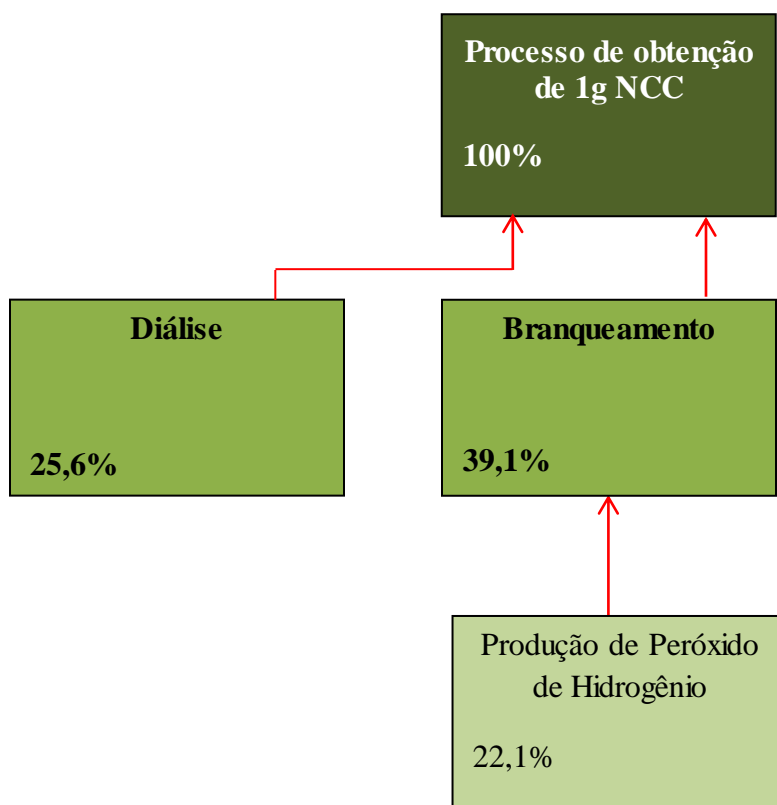
- Depleção Hídrica

Para a depleção hídrica, o branqueamento (39%) foi a etapa mais impactante (Figura 23), por conta do consumo de água e de peróxido de hidrogênio. O consumo direto de água durante o branqueamento também foi relevante. A diálise (27%) também acarretou depleção hídrica devido ao consumo abundante de água na lavagem da solução de nanocristais de celulose para redução do pH.

A hidrólise também contribuiu para o consumo de água devido à obtenção de energia e à utilização de ácido sulfúrico. Também o fracionamento da fibra de dendê também foi impactante o que se deve ao grande volume de água utilizado na irrigação do dendêzeiro.

O restante dos impactos na categoria de depleção hídrica (7,7%) é devido aos demais processos que consomem água e energia.

Figura 23 – Etapas impactantes na categoria “depleção hídrica”- Processo 2 (Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

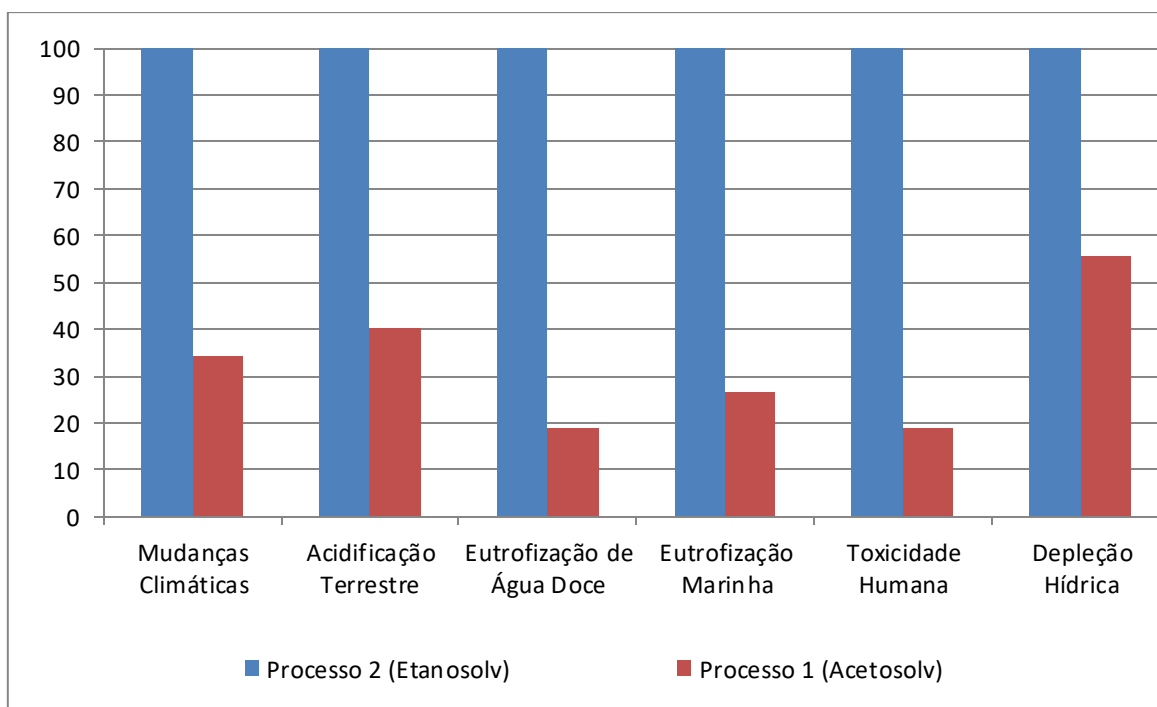
4.2.3 Comparação entre os processos 1 e 2 (Polpação Acetosolv e Etanosolv)

Comparando os processos de obtenção de nanocristais de celulose utilizando polpação acetosolv (processo 1) e polpação etanosolv (processo 2), os resultados mostraram que o processo 2 (com polpação etanosolv) foi mais ambientalmente impactante em todas as categorias avaliadas (Figura 24). Isto ocorreu porque a polpação acetosolv é um processo mais eficiente na remoção de lignina e hemicelulose devido ao uso de ácidos fortes bastante concentrados. Portanto, a polpa de celulose proveniente deste processo encontra-se com menores conteúdos amorfos (lignina), não requerendo que a etapa de branqueamento que a sucede precise ser severa.

Em contrapartida, a polpação etanosolv é mais branda, utilizando solventes mais fracos e reagentes pouco concentrados, porém menos eficiente, acarretando menor remoção de lignina e hemicelulose da polpa gerada, quando comparada à polpação acetosolv. O branqueamento da polpa oriunda do pré-tratamento etanosolv precisa ser realizada em condições muito mais severas a fim de prover fibra branqueada de qualidade semelhante à proveniente do branqueamento pós-acetosolv. Além disso, é necessário um maior tempo de reação e conseqüentemente maior consumo energético e demanda de água.

Enfim, o menor impacto da polpação etanosolv é insignificante frente ao maior impacto do processo de branqueamento que precisa existir em seguida, fazendo com que os nanocristais de celulose oriundos do pré-tratamento etanosolv causem maiores impactos do que os nanocristais resultantes do pré-tratamento acetosolv.

Figura 24 – Comparação entre Processos 1 e 2 (Polpação Acetosolv e Polpação Etanosolv)

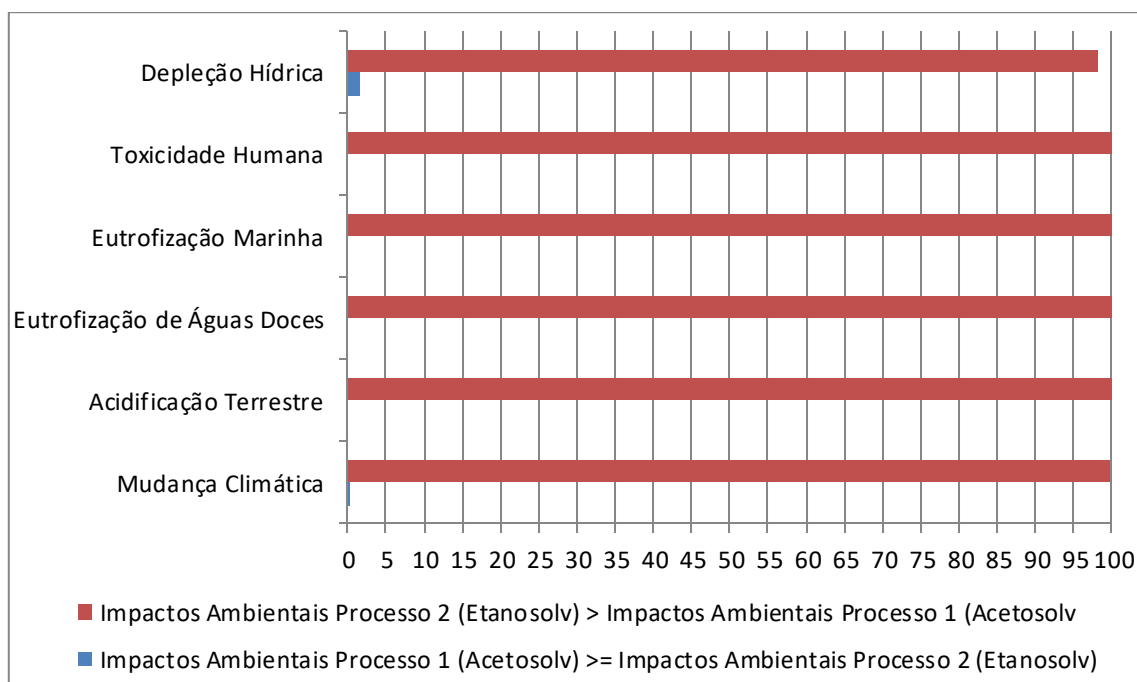


Fonte: A autora (2016).

4.2.4 Análise de erro

Para analisar os resultados obtidos por meio de estudos de natureza comparativa, é muito importante que sejam realizadas análises de erro para avaliar a significância dos resultados. A análise de erro mostra que o processo 2 (com polpação etanosolv) foi mais impactante ambientalmente em mais de 95% das repetições realizadas, confirmando a comparação já realizada (Figura 25).

Figura 25 – Análise de erro entre os Processos 1 e 2 (Polpação Acetosolv e Polpação Etanosolv)



Fonte: A autora (2016).

4.2.5 Comparação entre os processos 1 e 2 e a avaliação realizada por Freitas (2016)

O processo avaliado por Freitas (2016) desenvolvido por Souza (2014) para extração de nanocristais de dendê utiliza polpação acetosolv em condições diferentes de tempo e concentração de solvente, além de não contemplar explosão a vapor prévia das fibras (Tabela 18). Além disso, a etapa de branqueamento não utilizou silicato de sódio, como nos processos descritos neste trabalho.

Tabela 18 – Diferenças nos processos de obtenção de NCC

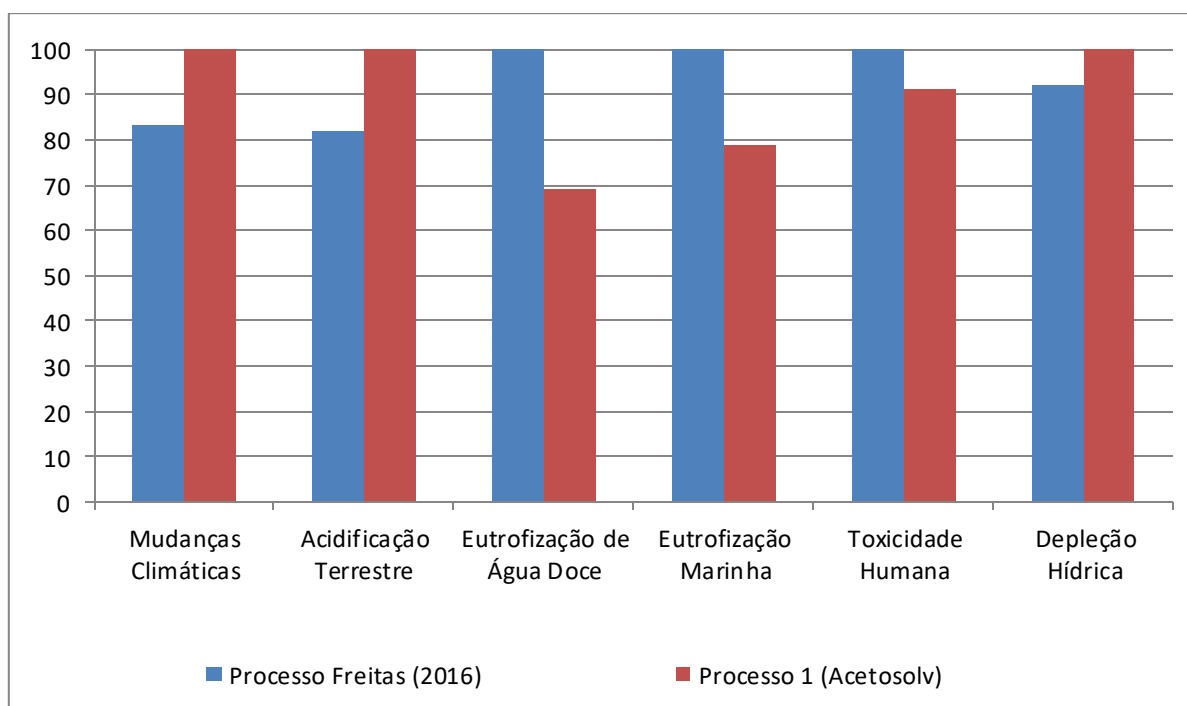
| | Obtenção de NCC – Processo avaliado por Freitas (2016) | Obtenção de NCC – Processo 1 (Polpação Acetosolv) | Obtenção de NCC - Processo 2 (Polpação Etanosolv) |
|---------------------------|--|---|---|
| Processos Contemplados | Moagem, polpação acetosolv, branqueamento, hidrólise, centrifugação e diálise. | Moagem, peneiramento, explosão a vapor, polpação acetosolv, branqueamento, hidrólise, centrifugação e diálise. | Moagem, peneiramento, explosão a vapor, polpação etanosolv, branqueamento, hidrólise, centrifugação e diálise. |
| Condições da Polpação | Polpação Acetosolv: Ácido acético 93% | Polpação Acetosolv: Ácido acético 80,2% | Polpação Etanosolv: Álcool etílico 95% |

| | | | |
|----------------------------|---|---|---|
| | com ácido clorídrico por 03 horas. | catalisado com ácido clorídrico por 35 minutos. | catalisado com hidróxido de sódio por 02 horas. |
| Condições do Branqueamento | Branqueamento: Hidróxido de sódio 4% e peróxido de hidrogênio 30% por 02 horas e 30 minutos | Branqueamento: Hidróxido de sódio 0,17%, silicato de sódio 0,14% e peróxido de hidrogênio 35% por 02 horas. | Branqueamento: Hidróxido de sódio 0,17%, silicato de sódio 0,14% e peróxido de hidrogênio 35% por 04 horas, seguido de mercerização com hidróxido de sódio 10% por mais 02 horas. |

Fonte: A autora (2016).

Comparando os processos de obtenção de nanocristais avaliado por Freitas (2016) com o processo que usa polpação acetosolv (menor impacto quando comparado com a polpação etanosolv), tem-se que o processo acetosolv é mais impactante nas categorias de mudanças climáticas, acidificação terrestre e depleção hídrica (Figura 26), enquanto o processo avaliado por Freitas (2016) é mais impactante para a eutrofização marinha, de água doce e toxicidade humana.

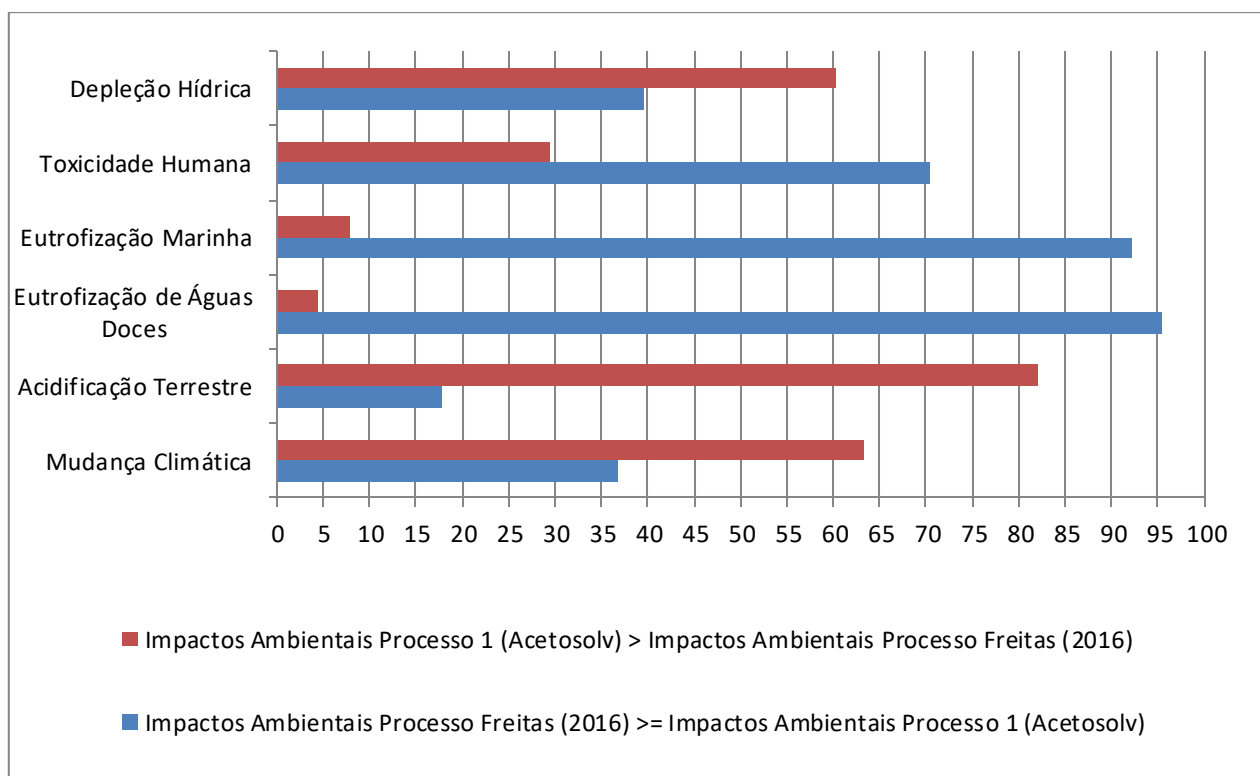
Figura 26 – Comparação entre os Processos 1 (Polpação Acetosolv) e Processo avaliado por Freitas (2016)



Fonte: A autora (2016).

Contudo, ao realizar a análise de erro, observa-se que em nenhuma das categorias avaliadas os impactos de um processo foram significativamente maiores que os impactos do outro, ou seja, nenhum teve desempenho ambiental melhor ou pior em mais de 95% das repetições (Figura 27), a não ser para eutrofização de água doce.

Figura 27 – Análise de erro entre o Processo 1 (Polpação Acetosolv) e o Processo avaliado por Freitas (2016)



Fonte: A autora (2016).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliados e comparados os impactos ambientais de dois processos de obtenção de nanocristais de celulose (NCC) a partir de fibras do mesocarpo do dendê (FPMD): processo 1, com polpação acetosolv, e processo 2, com polpação etanosolv.

Observou-se que no processo 1 (com polpação acetosolv), os processos unitários mais impactantes para as categorias analisadas de impacto são: i) branqueamento contribuindo para eutrofização de água doce e toxicidade humana, devido o consumo de energia e uso de peróxido de hidrogênio; ii) centrifugação contribuindo para mudanças climáticas, devido também ao consumo de energia; iii) hidrólise ácida contribuindo para acidificação terrestre, devido ao uso de ácido sulfúrico; iv) diálise contribuindo para depleção hídrica, devido ao consumo elevado de água; e v) fracionamento, contribuindo para a eutrofização marinha devido às práticas adotadas no cultivo do dendê. Na obtenção de NCC pelo processo 2 (com polpação etanosolv), o branqueamento destacou-se como o mais impactante para todas as seis categorias avaliadas. Isso decorreu do elevado consumo de energia, água e reagentes.

Comparando-se os processos 1 e 2, observou-se que a obtenção de NCC pelo processo 2 (com polpação etanosolv) é mais impactante para o meio ambiente que o processo 1 (com polpação acetosolv). Isto ocorreu porque, embora o processo unitário de polpação acetosolv em si seja muito agressivo (devido ao uso de ácido acético e ácido clorídrico), foi muito eficiente na remoção de lignina e hemicelulose contidas nas fibras. A polpa proveniente do processo acetosolv se encontra com reduzido teor de lignina e hemicelulose, de modo que a etapa de branqueamento, posterior ao pré-tratamento-acetosolv, foi realizada em condições mais brandas e com menor tempo de reação, sem comprometer a qualidade da polpa de celulose obtida. Assim, indica-se a obtenção de NCC por meio do processo 1 (polpação acetosolv).

Comparando-se o processo 1 com o processo desenvolvido por Souza (2014) para extração de NCC a partir da FPMD, avaliado por Freitas (2016), observou-se que o processo 1 acarreta impactos similares ao primeiro processo desenvolvido. Assim, quando for realizado o escalonamento do processo de extração de NCC a partir da FPMD, qualquer um desses dois processos pode ser empregado.

REFERÊNCIAS

- ABRAPALMA: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. **A palma no Brasil e no mundo**, 2014. Disponível em: <<http://www.abrapalma.org/pt/a-palma-no-brasile-no-mundo/>>. Acesso em: 20 out.2016.
- ALTHAUS, H.J., FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. **Int J Life Cycle Assessment** 10: 3, 2003.
- BAUMANN, H.; TILLMAN, A.M. **The Hitch Hickers's Guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application**. Lund: Studentlitteratur AB, 2004.
- BRINCHI, L.; COTANA, F.; FORTUNATI, E.; KENNY, J.M. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, n. 1, p. 154-169, 2013.
- BROWN, T. L.; LEMAY Jr. H. E.; BURSTEN, B. E. **Química Ciência Central**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1999.
- CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 104p, 1997.
- CONSOLI, F., ALLEN, D., BOUSTEAD, I., FAVA, J., FRANKLIN, W., JENSEN, A., OUDE, N., PARRISH, R., PERRIMAN, R., POSTLETHWAITE, D., QUAY, B., SÉGUIN, J., E VIGON B. **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"**. Sesimbra: Portugal. SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1993.
- FERREIRA, V.F.; SILVA, F.C.; PERRONE, C.C. Sacarose no laboratório de química orgânica de graduação. **Química Nova**, v. 24 (6), 2001. p. 905-907.
- FREITAS, T.S. **Avaliação do ciclo de vida da produção de nanocristais de celulose a partir das fibras da prensagem do mesocarpo do dendê**. 2016. Monografia – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- FRISCHKNECHT R., JUNGBLUTH N., ALTHAUS H.-J., DOKA G., DONES R., HISCHIER R., HELLWEG S., NEMECEK T., REBITZER G. AND SPIELMANN M. **Implementation of life cycle impact assessment methods**. Ecoinvent report, 2007.
- GAVANKAR, S.; SUH, S.; KELLER, A. F. Life cycle assessment at nanoscale: review and recommendations. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 3, p. 295- 303, 2012.
- GHAFFAR, S.H; FAN. Lignin in Straw and its Applications as an Adhesive. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v.13, p. 1-36, 2013.
- GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, T.; PONSIOEN, T.; MEJIER, E. **ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**, v. 1, 2009.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, T.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **Introduction no LCA with SimaPr**. v. 5.2, 2016.

GUINÉE, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The international journal of life cycle assessment**, v. 7, n. 5, p. 311-313, 2002.

HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; ROJAS, O. J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. **Chemical reviews**, v. 110, n. 6, p. 3479-3500, 2010.

HETHERINGTON, A. C. *et al.* Use of LCA as a development tool within early research: challenges and issues across different sectors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 130-143, 2014.

HISCHIER, R.; WALSER, T. Life cycle assessment of engineered nanomaterials: state of the art and strategies to overcome existing gaps. **Science of the Total Environment**, v. 425, p. 271- 282, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040: environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. Genebra: ISO: 2009a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14044: environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**.Genebra: ISO: 2009b.

JARDINE,J.G.; BARROS, T.D; **Dendê**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vmz02wx5eo0sawqe3valo63n.html>. Acesso em: 04 out.2016

JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (2011).**ILCD handbook general guide for life cycle assessment— recommendations for life cycle impact assessment in the European context—based on existing environmental impact assessment models and factors**. Luxembourg: 2011.

KLEMM, D.;KRAMER, F.; MORITZ, S.; LINDSTRÖM, T.; ANKERFORS, M.; GRAY, D.; DORRIS. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 50, n. 24, p. 5438-5466, 2011.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba. (3ª. Edição revisada). p.86. 2005.

KOELLNER, T.; GEYER, R. Global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 6, p. 1185-1187, 2013.

LAVOINE. N.; DESLOGE. I.; DUFRESNE. A.; BRAS J. Microfibrillated cellulose—Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. **Carbohydrate polymers**, v. 90, n. 2, p. 735-764, 2012.

- LU, Z.; FAN, L.; ZHENG, H.; LU, Q.; LIAO, Y.; HANG, B. Preparation, characterization and optimization of nanocellulose whiskers by simultaneously ultrasonic wave and microwave assisted. **Bioresource technology**, v. 146, p. 82-88, 2013.
- MOON, R.J. *et al.* Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011.
- NASCIMENTO, D.M. **Comparação ambiental e tecnológica de nanoestruturas de celulose obtidas da fibra de coco**. 2014. Dissertação - Departamento de Química Orgânica e Inorgânica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- NETO, F. P. M. **Explosão a vapor como método de obtenção de lignina e polpa celulósica**. 2016. Dissertação - Departamento de engenharia Química. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- PATI, P.; MCGINNIS, Sean; VIKESLAND, PETER J. Life cycle assessment of “green” nanoparticle synthesis methods. **Environmental Engineering Science**, v. 31, n. 7, p. 410-420, 2014.
- POKU, K. **Small-scale palm oil processing in Africa**. Food & Agriculture Org., 2002.
- ROSA, M. F.; MEDEIROS, E. S.; MALMONGE, J. A.; GREGORSKI, K. S.; WOOD, D. F.; MATTOSO, L. H. C.; GLEN, G.; ORTS, W. J.; IMAM, S. H. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. **Carbohydrate Polymers**, v. 81, n. 1, p. 83-92, 2010.
- ROSENBAUM, R. K. *et al.* USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532-546, 2008.
- SARKANEN, K. V. **Normas Tappi**, v. 73(10), p. 215, 1990.
- SHUKRY, N.; FADEL S. M; AGBLEVOR, F. A; EL-KALYUBI S. F. **Journal of Applied Polymer Science**, v.109, p. 434, 2008.
- SONNEMANN, G.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. **Integrated Life Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes**. London: Lewis Publishers, 2003.
- SOUZA, N. F. **Processos de obtenção de nanocelulose a partir das fibras da prensagem do mesocarpo do dendê**. 2014. Dissertação - Departamento de engenharia Química. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- SOUZA, N. F.; PINHEIRO, J. A.; BRÍGIDA, A. I. S.; MORAIS, J. P. S.; FILHO, M. S. M. S.; ROSA, M. F. **Fibrous residues of palm oil as a source of green chemical building blocks**. 2016.
- WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 1, 1997. 543p.