

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E GESTÃO EM TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

THAMIRIS LINHARES MARQUES

**AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E DA PEGADA HÍDRICA DO  
PROCESSAMENTO DA CARNE DE FRANGO NO CENTRO OESTE DO BRASIL**

Sorocaba

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E GESTÃO EM TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

THAMIRIS LINHARES MARQUES

**AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E DA PEGADA HÍDRICA DO  
PROCESSAMENTO DA CARNE DE FRANGO NO CENTRO OESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva

Coorientação: Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Cléa Brito de Figueiredo

Financiamento: Coordenação de  
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
- CAPES

Sorocaba

2019

LINHARES MARQUES, THAMIRIS

AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E DA PEGADA HÍDRICA DO  
PROCESSAMENTO DA CARNE DE FRANGO NO CENTRO OESTE DO  
BRASIL / THAMIRIS LINHARES MARQUES. -- 2019.

108 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: THAMIRIS LINHARES MARQUES

Banca examinadora: Yovana Maria Barrera Saavedra; José Adolfo de  
Almeida Neto

Bibliografia

1. Avaliação da Pegada Hídrica. 2. Ecoeficiência. 3. Avaliação do Ciclo  
de Vida. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

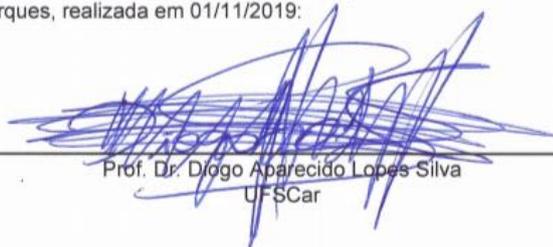
Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Thamiris Linhares Marques, realizada em 01/11/2019:



---

Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva  
UFSCar

---

Prof. Dr. José Adolfo de Almeida Neto  
UESC



---

Profa. Dra. Yovana Maria Barrera Saavedra  
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) José Adolfo de Almeida Neto e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



---

Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva

*Dedico este trabalho aos meus pais Josair e Eleuza, meus irmãos Thiago e Marcus Vinicius pelo apoio, incentivo, ensinamentos, orações e esforços imensuráveis para minha formação!*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pelo dom da vida, pela oportunidade e por todas as bênçãos recebidas.

Aos meus pais, Josair e Eleuza, por todo incentivo, suporte, apoio e esforços imensuráveis para apoiar todos os meus sonhos e conquistas.

Aos meus irmãos, Thiago e Marcus Vinicius, por serem meus companheiros e confidentes, que sempre me ajudam a superar os obstáculos.

Aos Professores Diogo Aparecido Lopes Silva e Maria Cléa Brito de Figueiredo pela atenção e paciência. Por saber impulsionar minha evolução acadêmica. Suas orientações e conselhos permitiram o meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Aos colegas do mestrado, que sempre me auxiliaram, motivaram e que sempre estavam disponíveis para conselhos e conversas.

A empresa estudo de caso que disponibilizou os dados para que esta pesquisa científica pudesse ser realizada.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de fazer parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Campus-Sorocaba.

A CAPES, pela bolsa concedida durante a realização deste projeto.

A todos os meus professores, obrigado pelo conhecimento transmitido.

A todos as pessoas, amigos e familiares cujos nomes não estão citados, mas que fazem parte da minha vida e me apoiaram até esse momento.

Muito obrigada!

## RESUMO

MARQUES, Thamiris Linhares. **Avaliação da ecoeficiência e da Pegada Hídrica do processamento da carne de frango no centro oeste do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Sorocaba, 2019.

A água é um recurso natural ser indispensável à vida na Terra sendo aplicada direta ou indiretamente em todas as atividades produtivas. Assim, atentar-se para os impactos decorrentes do uso desse bem é tema relevante para o desenvolvimento de uma mais produção sustentável. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de carne de frango, o que pode acarretar em diversos impactos ambientais, entre eles aos recursos hídricos. Neste sentido, esta dissertação objetivou realizar uma Avaliação da Pegada Hídrica e uma Análise da Ecoeficiência do processamento do frango inteiro resfriado produzido no Brasil. Para Avaliação da Pegada Hídrica foi utilizado as diretrizes descritas na norma ISO14046:2014 e foram utilizados o método *ReCiPe Midpoint (H)* para as categorias eutrofização de água doce, o modelo *USEtox* para as categorias de ecotoxicidade e toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, e o modelo *Available Water Remaining (AWARE)* para a categoria de escassez hídrica. O sistema de produto definido foi modelado sob uma perspectiva *cradle-to-gate*, desde a obtenção do frango vivo até seu abate, e o processamento da carne e de seus coprodutos. A ecoeficiência foi mensurada para cada um dos processos mapeados com base na norma ISO 14045:2012. Os resultados mostraram que a engorda das aves é processo com maior geração de impactos hídricos (até 98,7%) quando comparado aos processos elementares da etapa de manufatura. Sabendo que o tempo é um aspecto fundamental para qualquer processo manufatureiro, os resultados da Avaliação da Pegada Hídrica foram associados ao tempo de processamento da engorda das aves e da manufatura, sendo que a inclusão do tempo modificou os resultados, tornando a etapa de manufatura o maior *hotspot* ambiental no estudo. Dentro da manufatura, o processo de resfriamento foi o processo mais danoso aos recursos hídricos (até 99,7%) por unidade de tempo. Sobre a ecoeficiência, o processo mais ecoeficiente foi a depenagem e os processos menos ecoeficientes foram a sangria e o resfriamento. Por fim, pode-se concluir que houve uma modificação dos processos *hotspots* quando realizada a avaliação da ecoeficiência. Portanto, a definição da adoção ou não desse indicador no estudo se mostrou fundamental para proposição de melhorias e criação de novos cenários alternativos que melhorassem o desempenho ambiental do ciclo de vida do produto.

Palavras-chave: Gestão do ciclo de vida. Avaliação de impacto. Processos de manufatura. Agroindústria. Avicultura. Abatedouro.

## ABSTRACT

MARQUES, Thamiris Linhares. *Ecoefficiency and Water Footprint Assessment of the processing of chicken meat in the central-west of Brazil*. MSc Dissertation (Production Engineering) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2019.

Water is an indispensable natural resource for life on Earth and it is used indirectly or directly at all productive activities. Therefore, attention to the impacts of water use is a relevant topic for the sustainable production. Brazil is one the world's largest producer of chicken meat, which can promote several environmental impacts, including water resources. Thus, the objective of this master's dissertation was to perform a Water Footprint Assessment and ecoefficiency assessment of the processing of poultry meat in Brazil. For the water footprint, it was used the ISO14046:2014 standard and the impact assessment methods chosen were: ReCiPe Midpoint (H) for freshwater eutrophication category, USEtox for ecotoxicity and carcinogenic and non-carcinogenic human toxicity categories, and the Available Water Remaining (AWARE) method was adopted for the water scarcity category. The product system defined was modeled from a cradle-to-gate perspective, from obtaining live chicken to slaughter, and processing meat and co-products generation. In addition, eco-efficiency was measured for each of the processes mapped based on ISO 14045:2012 guidelines. The results showed that chicken farm is a process with greater generation of water impacts (up to 98,7%) when compared to the industrial manufacturing activities. However, knowing that time is a key issue for any manufacturing process, the water footprint associated with poultry fattening and manufacturing processing time were evaluated, showing that the manufacturing was the environmental hotspot at this time. At manufacture level, chilling was the most damaging process to water resources (up to 99,7%) per unit of time. The most ecoefficient process was defeathering and the least one was the bleeding process. Finally, it can be concluded that there was a change in the environmental hotspot analysis of the study when performing the ecoefficiency assessment vs. Water Footprint approach. Therefore, adopting or not of both of these two approaches is critical for proposing improvements and creating new scenarios looking for alternatives for improving environmental performance under the life cycle of products.

*Keywords: Life cycle management. Impact assessment. Manufacturing process. Agribusiness. Chicken farming. Slaughterhouse*

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Componentes da Pegada Hídrica segundo WFN .....	15
FIGURA 2 - Tipos comuns de sistemas de produto adotados em estudos de ACV .....	20
FIGURA 3 - Procedimentos para análise de inventário da Pegada Hídrica.....	21
FIGURA 4 - Mapa dos fatores de caracterização WSI para escassez hídrica.....	25
FIGURA 5 - Mapa dos fatores de caracterização mensal, WSI para escassez hídrica.....	26
FIGURA 6 - Mapa dos fatores de caracterização anual, AWARE para escassez hídrica.....	27
FIGURA 7 - Fases para avaliação da ecoeficiência - ISO 14045:2012 .....	33
FIGURA 8 - Fluxograma dos procedimentos realizadas para a revisão da literatura .....	35
FIGURA 9 - Fluxograma das etapas de seleção dos documentos dentro da WoS e da Scopus .....	36
FIGURA 10 - Processos elementares considerados para efeito da definição do sistema de produto – processamento do frango inteiro resfriado.....	40
FIGURA 11 - Bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia.....	46
FIGURA 12 - Produtos e coprodutos gerados na produção do frango inteiro .....	49
FIGURA 13 - Procedimento para evitar uso da alocação no sistema de produto estudado – expansão do sistema .....	50
FIGURA 14 - Fluxo da água e do efluente na empresa estudada.....	51
FIGURA 15 - Evolução histórica das publicações sobre Pegada Hídrica de produtos.....	56
FIGURA 16 - Contabilização da participação dos países nos documentos analisados.....	57
FIGURA 17 - Periódicos com maior número de publicações sobre Pegada Hídrica na manufatura .....	58
FIGURA 18 - Mapa dos artigos mais citados sobre Pegada Hídrica na manufatura de produtos na base de dados WoS .....	60
FIGURA 19 - Mapa de cocitação da Pegada Hídrica na manufatura pela base de dados Scopus .	61
FIGURA 20 – Setores da manufatura que os estudos de Pegada Hídrica foram aplicados. ....	64
FIGURA 21 – Uso e consumo de água no processamento do frango inteiro L/kg. ....	72
FIGURA 22 - Consumo de energia para produção para 1 kg de frango inteiro resfriado (kWh/kg) .....	72
FIGURA 23 - Contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (situação de referência).....	73
FIGURA 24 - Contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (alocação econômica).....	75

FIGURA 25 - Percentual de impactos associados a uma hora de processamento .....	77
FIGURA 26 - Análise de contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (receita) .....	79
FIGURA 27 – Contribuição da Pegada Hídrica para os cenários 1, 2 e 3.....	80
FIGURA 28 - Avaliação da Pegada Hídrica do sistema de tratamento de efluente.....	83
FIGURA 29 - Percentuais da avaliação da ecoeficiência para o sistema de referência .....	84

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Avaliação da Pegada Hídrica para diferentes setores/produtos do Brasil.....	30
QUADRO 2 - Processos adotados na modelagem da avaliação da Pegada Hídrica de 1 kg de frango inteiro resfriado .....	44
QUADRO 3 – Outros processos adotados na modelagem da avaliação da Pegada Hídrica de 1 kg de frango inteiro resfriado .....	45
QUADRO 4 - Unidade de medidas para os indicadores de ecoeficiência. ....	54
QUADRO 5 - Instituições com maior representatividade pelo número de publicações .....	57
QUADRO 6 - Autores mais citados sobre o tema Pegada Hídrica na manufatura de produtos .....	59
QUADRO 7 - Documentos mais citados dentro da temática Pegada Hídrica dentro da amostra da base de dados Scopus.....	62
QUADRO 8 - Produtos analisados dentro do contexto de Pegada Hídrica na manufatura de produtos .....	63

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Características da água residual após tratamento do efluente .....	48
TABELA 2 - Percentuais de participação dos produtos na produção de 1 kg de frango inteiro resfriado. .....	49
TABELA 3 - Inventário do processo de descanso das aves .....	66
TABELA 4 - Inventário do processo de recepção das aves .....	67
TABELA 5 - Inventário do processo de insensibilização e sangria .....	67
TABELA 6 - Inventário do processo de escaldagem de frango .....	68
TABELA 7 - Inventário do processo de depenagem de frango .....	68
TABELA 8 - Inventário do processo de evisceração de frango .....	69
TABELA 9 - Inventário do processo de resfriamento de frango .....	69
TABELA 10 - Inventário da Estação de Tratamento de Água (ETA) .....	70
TABELA 11 - Inventário do processo da produção de vapor .....	70
TABELA 12 - Inventário do processo de água pressurizada para higienização .....	71
TABELA 13 - Inventário da Estação de Tratamento de Efluente (ETE).....	71
TABELA 14 - Receita do ano de 2018 obtida na produção do frango inteiro resfriado.....	78
TABELA 15 - Comparação de cenários para diferentes FC para a categoria de escassez hídrica .....	82

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	14
1.1.1 Objetivo geral .....	14
1.1.2 Objetivos específicos .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 ABORDAGENS METODOLÓGICAS PARA A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA .....	15
2.1.1 Abordagem segundo o indicador da Pegada Hídrica criado pelo grupo WFN .....	15
2.1.2 Abordagem segundo a normativa ISO 14046:2014.....	16
2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo .....	18
2.1.2.2 Análise de inventário da Pegada Hídrica .....	20
2.1.2.3 Avaliação de impactos da Pegada Hídrica.....	22
2.1.2.4 Interpretação dos resultados da avaliação da Pegada Hídrica .....	29
2.2 ESTUDOS SOBRE A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA NO BRASIL .....	30
2.2.1 Avaliação da Pegada Hídrica no Brasil.....	30
2.2.2 Estudos de avaliação ambiental da carne de frango .....	32
2.3 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA .....	32
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E BIBLIOMETRIA .....	35
3.2 O ESTUDO DE CASO – AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E PEGADA HÍDRICA .....	37

<b>3.2.1 Definição de objetivo e escopo.....</b>	<b>38</b>
<i>3.2.1.1 Definição do sistema de estudo, fronteira do sistema e unidade funcional.....</i>	<i>39</i>
<i>3.2.1.3 Requisitos de qualidade dos dados .....</i>	<i>47</i>
<i>3.2.1.4 Definição do critério de corte .....</i>	<i>48</i>
<i>3.2.1.5 Procedimentos de alocação .....</i>	<i>48</i>
<b>3.2.2 Análise do inventário da Pegada Hídrica .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.3 Avaliação de impacto da Pegada Hídrica e tipos de impactos.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.4 Interpretação dos resultados.....</b>	<b>52</b>
<i>3.2.4.1 Análise de sensibilidade .....</i>	<i>52</i>
<i>3.2.4.2 Análise de cenários .....</i>	<i>52</i>
<b>3.3 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA .....</b>	<b>53</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 RESULTADOS DA RBS SOBRE A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA NA MANUFATURA DE PRODUTOS .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE PEGADA HÍDRICA.....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.1 Análise de sensibilidade .....</b>	<b>75</b>
<i>4.3.1.1 Adoção do critério de alocação econômica.....</i>	<i>75</i>
<b>4.4 ANÁLISE DE CENÁRIOS E DE MELHORIAS PARA O CICLO DE VIDA DO PRODUTO .....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.1 Cenários modificando o consumo de energia e água na manufatura do produto.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.2 Cenário focado na avaliação da Pegada de Escassez Hídrica.....</b>	<b>81</b>

4.4.3 Cenário de avaliação da Pegada Hídrica incluindo o tratamento de efluentes .....	82
4.5 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA .....	84
5 CONCLUSÕES.....	87
ANEXO A – Passos para cálculo de avaliação de Pegada Hídrica pelo grupo WFN .....	99
ANEXO B – Passos para realização da revisão sistemática da literatura.....	101
ANEXO C - Protocolo para realização do estudo de caso .....	102
ANEXO D – Carta de apresentação para realização do estudo de caso .....	103
ANEXO E – Resultado para avaliação da Pegada Hídrica da situação de referência...	105
ANEXO F – Resultado para avaliação da Pegada Hídrica da situação de referência para o critério de alocação econômica .....	105
ANEXO G – Resultados da Avaliação da Pegada Hídrica para os cenários 1, 2, 3. ....	106
ANEXO H – Impactos da avaliação da Pegada Hídrica a partir da receita da empresa estudada.....	106
ANEXO I – Avaliação da Pegada Hídrica incluindo o sistema de tratamento de efluentes .....	107
ANEXO J – Avaliação da ecoeficiência .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial para existência e manutenção da vida humana e dos ecossistemas. Além disso, é um recurso fundamental para a realização de diversas atividades relevantes para economia, meio ambiente e sociedade. As atividades antrópicas podem afetar os recursos hídricos de forma negativa, alterando a quantidade e a qualidade desse recurso, acarretando a sua escassez, e sua poluição, impactando diretamente o ecossistema e a vida. Sendo assim, torna-se imprescindível tomar medidas estratégicas para otimizar o uso e minimizar os impactos oriundos do uso inadequado dos recursos hídricos.

A Organização das Nações Unidas – ONU (2019) prevê um crescimento populacional em mais de um bilhão de pessoas para os próximos 15 anos e deverá chegar a 8,5 bilhões de habitantes até 2030. Tal crescimento da população mundial acarretará, no aumento da demanda por diversos recursos naturais, entre eles a água.

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2017), o consumo de água brasileiro vem crescendo consideravelmente, sendo previsto o aumento de até 30% da demanda de água até 2030. Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que contribuam para a redução dos impactos ambientais adversos gerados pelas atividades humanas, em especial nos sistemas de produção industriais.

Em 2002, o professor e pesquisador Arjen Hoekstra introduziu o termo “*water footprint*”, em português Pegada Hídrica, como uma definição para a quantificação da água incorporada aos bens. Posteriormente, esse conceito passou a ser utilizado para mensurar a quantidade de água consumida e necessária para diluição de poluentes na produção de bens e serviços ao longo da cadeia de valor (*WATER FOOTPRINT NETWORK – WFN*, 2019).

Anos depois, foi desenvolvida a norma ISO 14046:2014 sobre a avaliação da Pegada Hídrica, a qual inclui os principais elementos de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), segundo os moldes das normativas ISO 14040 e 14044. A Norma ISO 14046:2014 está focada na avaliação dos fluxos de água dentro de um sistema produtivo e dos potenciais impactos ambientais decorrentes do uso dela ao longo do ciclo de vida de um produto (*INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO*, 2014). Com a utilização da norma ISO 14046:2014 é possível propor melhorias para minimizar os *hotspots* ambientais (pontos críticos) nas etapas do ciclo de vida onde os impactos hídricos forem mais significativos.

Ao mesmo tempo que é necessário reduzir o impacto ambiental associado ao uso da água, também é necessário agregar maior valor aos produtos postos no mercado. Para tanto, se destaca o indicador de ecoeficiência proposto pelo *World Business Council For Sustainable Development* - WBCSD (1995) e mais tarde normalizado pela ISO 14045:2012. A ecoeficiência visa gerar valor ao menor impacto ambiental (Verfaillie; Bidwel, 2000), sendo uma medida que colabora para uma produção ambientalmente mais correta. Contudo, são escassos os estudos envolvendo o uso da ecoeficiência combinada à gestão dos recursos hídricos por meio da Pegada Hídrica.

Sendo assim, este estudo realizou uma avaliação da ecoeficiência e da Pegada Hídrica de 1 kg de frango inteiro resfriado em uma indústria avícola localizada em Goiás/GO. É importante frisar que todas as etapas da cadeia produtiva do frango são caracterizadas por um consumo volumoso de água em suas atividades (VIOLA et al., 2011), o que motivou a realização deste trabalho. Além disso, estudar o uso da ecoeficiência para um sistema de produção da carne de frango ainda se mostra um tópico de pesquisa não explorado segundo a literatura consultada (ver seção 2.3), o que também justificou a realização desta dissertação.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar os impactos ambientais ocasionados aos recursos hídricos a partir do processamento de 1kg de frango inteiro resfriado por meio da avaliação da Pegada Hídrica e da ecoeficiência do produto.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Quantificar os aspectos ambientais relacionados ao uso da água no sistema de produto estudado;
- Avaliar a Pegada Hídrica, considerando as categorias de escassez hídrica, ecotoxicidade, toxicidade humana e eutrofização de água doce;
- Avaliar a ecoeficiência do sistema de produto mapeado;
- Identificar *hotspots* e oportunidades para redução da pegada e aumento da ecoeficiência para o sistema de produto estudado;
- Propor cenários alternativos de produção e analisá-los criticamente.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

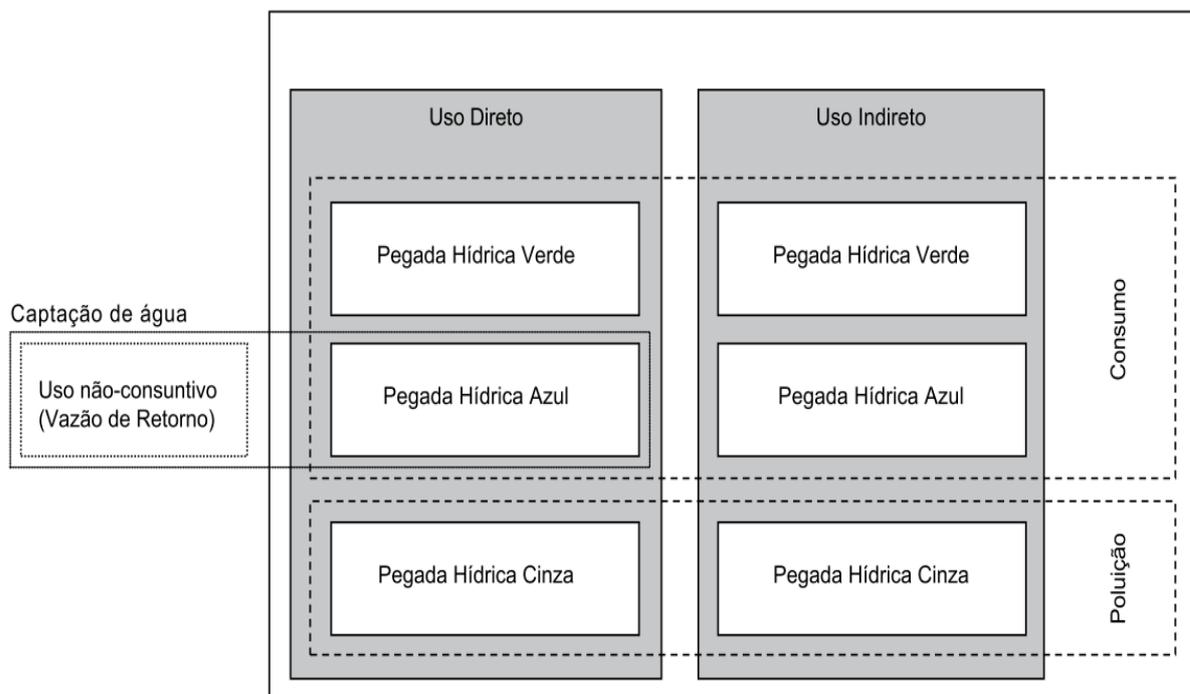
Esta seção do texto está organizada da seguinte forma: a seção 2.1 apresenta o contexto sobre as principais abordagens metodológicas para a avaliação da PH de produtos; já a seção 2.2 apresenta estudos sobre a Pegada Hídrica de produtos no Brasil; e por fim, a seção 2.3 realiza uma revisão sobre a avaliação da ecoeficiência com foco na manufatura de produtos e na gestão de recursos hídricos.

### 2.1 ABORDAGENS METODOLÓGICAS PARA A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA

#### 2.1.1 Abordagem segundo o indicador da Pegada Hídrica criado pelo grupo WFN

O indicador proposto por Hoekstra et al. (2011) também é conhecido na literatura pela sigla WFN, do inglês, “*Water Footprint Network*”, contabiliza o volume de água consumida direta e indiretamente em um sistema produtivo, sem considerar os impactos ambientais decorrentes. Nesse contexto, a Pegada Hídrica está focada na quantificação da Pegada Hídrica verde, azul e cinza (Figura 1).

FIGURA 1 - Componentes da Pegada Hídrica segundo WFN



Fonte: HOEKSTRA et al. (2011).

Sendo elas:

- **Pegada Hídrica Verde** – refere-se a toda água da chuva que é absorvida pelo solo, evaporada ou incorporada pelas plantas (que não é escoada);
- **Pegada Hídrica Azul** – compreende em toda a água de fonte superficial e/ou subterrânea retirada para uso que não retorna ao local de captação, sendo evaporada ou incorporada a um produto; ou a água que é retirada de um corpo hídrico e é despejada em outro, ou relançada após determinado tempo;
- **Pegada Hídrica Cinza** – consiste na quantificação da água necessária para diluição de poluentes que chegam aos corpos hídricos, considerando o padrão de qualidade de um determinado poluente, estabelecido em lei.

A Pegada Hídrica representa o consumo de água de acordo com a fonte e o volume empregado na diluição do poluente, devendo ser especificada temporalmente e geograficamente. Pelo manual da Pegada Hídrica, proposto por Hoekstra et al. (2011), a avaliação da Pegada Hídrica deve ser realizada em quatro fases distintas, sendo elas: definição do objetivo e escopo, contabilização da Pegada Hídrica, avaliação da sustentabilidade da Pegada Hídrica e formulação de respostas à Pegada Hídrica.

Assim, a Pegada Hídrica de um produto resultará do somatório dos volumes de água consumidos e empregados na diluição de um poluente, contabilizados em cada etapa da produção. No Anexo A é apresentado as equações para mensurar a Pegada Hídrica azul, verde e cinza de processos produtivos, pelo grupo WFN.

Ressalta-se que a abordagem WFN não mensura os impactos potenciais do ciclo de vida de um produto, focando-se na mensuração de aspectos ambientais (consumo de água e água para diluição de poluente) e por tipologia (azul, verde, cinza e o volume total). Assim, na seção 2.1.2 será abordada a abordagem recente proposta pela normativa ISO14046:2014, a qual além de avaliar todo o ciclo de vida de um produto, mensura não somente os aspectos ambientais, mas também, os impactos potenciais.

### **2.1.2 Abordagem segundo a normativa ISO 14046:2014**

Em 2014, foi publicada a norma ISO 14046, que expande o conceito de avaliação da Pegada Hídrica com a incorporação da avaliação dos impactos ambientais relacionados ao uso

direto e indireto da água, sob a perspectiva de ciclo de vida de produto (ISO, 2014). Essa norma foi fundamentada nas normativas ISO 14040 e ISO 14044.

Dentro dessa abordagem, a normativa estabelece que os estudos devem evidenciar quais aspectos da cadeia que estão sendo analisados, ou seja, deve-se identificar claramente quais aspectos relacionados a água serão analisados. Portanto, os estudos que tratam aspectos relacionados apenas ao consumo de água, devem ser definidos como estudos voltados para Pegada de Escassez Hídrica (PEH) ou Pegada de Disponibilidade Hídrica (PDH).

Os estudos de Pegada Hídrica que além da categoria de escassez hídrica, avaliam também os impactos dos poluentes em recursos hídricos, ou seja, que incluem as categorias relacionadas à degradação da água, como eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana, são definidos como estudos de avaliação da Pegada Hídrica. A ideia é que na medida em que novos métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida forem definidos para categorias relacionadas à água, essas novas categorias passem também a integrar estudos de Pegada Hídrica.

A escassez hídrica refere-se a extensão em que a demanda de água (humana e do ecossistema) é atendida pela disponibilidade (ISO, 2014). Dessa forma, a escassez hídrica ocorre quando a demanda por água se aproxima da reposição, considerando os aspectos temporais e geográficos.

A eutrofização é um problema ambiental gerado pela ação humana de descarte de efluentes ricos em fósforo (P) ou nitrogênio (N) nos corpos hídricos, que proporciona o aumento desses nutrientes no local (WITHERS et al., 2014). O excesso de nutrientes acarreta o crescimento de plantas aquáticas, que dificultam a passagem da luz solar para o corpo hídrico e então reduz a concentração de oxigênio dissolvido no local, o que interfere diretamente na qualidade da água e no equilíbrio do ecossistema. Outro problema é a proliferação de cianobactérias (algas azuis), que produzem e liberam componentes tóxicos que são nocivos à saúde humana e animal (FIGUEIRÊDO et al., 2017).

A toxicidade refere-se ao grau que determinada substância tóxica (metais pesados, pesticidas, solventes entre outros) possui para afetar à saúde humana, de outros organismos e o ecossistema. Essa categoria de impacto é dividida em ecotoxicidade e toxicidade humana (ROSENBAUM et al., 2008). Segundo o Centro de Investigação e o Serviço de Ciência e Conhecimento da Comissão Europeia (*Joint Research Centre*), a toxicidade refere-se aos efeitos cancerígenos na saúde humana, efeitos não cancerígenos na saúde humana, radiação

ionizante, material particulado e ecotoxicidade aquática (*JOINT RESEARCH CENTRE - JRC*, 2011). O modelo de avaliação de impacto na toxicidade mais empregado e de maior consenso científico na atualidade é o USETox (ROSENBAUM et al., 2008) que gera fatores de caracterização para avaliação da toxicidade humana e ecotoxicidade.

De acordo com a ISO 14046, para se realizar a avaliação da Pegada Hídrica, quatro fases devem ser trilhadas: a definição de escopo e objetivo, análise de inventário de Pegada Hídrica, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados.

#### *2.1.2.1 Definição de objetivo e escopo*

A avaliação da Pegada Hídrica proposta na ISO 14046:2014 inicia-se com a definição do objetivo e escopo. A definição do objetivo deve conter as seguintes informações: qual a aplicação do estudo; a motivação para realiza-lo; qual o público que será atingido; se o estudo é independente ou parte de um estudo prévio de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); se os resultados serão divulgados publicamente; e se se o estudo será do tipo ACV comparativa.

Definido o objetivo, a próxima fase é executada com a definição do escopo. Segundo a ISO (2014), nessa etapa devem ser descritos os seguintes elementos:

- Sistema de estudo e limite do sistema;
- Unidade funcional;
- Cobertura temporal, geográfica;
- Requisitos de qualidade dos dados;
- Critério de corte;
- Procedimento de alocação;
- Premissas, escolhas de valor e elementos opcionais;
- Metodologia de avaliação de impacto da Pegada Hídrica e tipos de impactos;
- Especificar indicador de impacto (se incluir resultado);
- Especificar se o estudo é ou não abrangente;

- Qual causa efeito da cadeia e impactos abordado;
- Incertezas e limitações;
- Justificar exclusões do estudo;
- Quando houver comparações descreve-las;
- Descrever o tipo de relatório;
- Descrever o tipo de revisão crítica, se houver

Segundo a norma ISO 14046:2014, o limite do sistema de estudo deve determinar os processos da avaliação de forma consistente com os objetivos; identificar e explicar os critérios utilizados para definir os limites do sistema; documentar os limites; indicar se o estudo analisa um processo, produto ou organização; identificar os processos elementares incluídos na análise do inventário e justificar a exclusão de algum processo (se houver) do sistema de produto; e definir nível de detalhamento da análise de inventário da Pegada Hídrica (ISO, 2014).

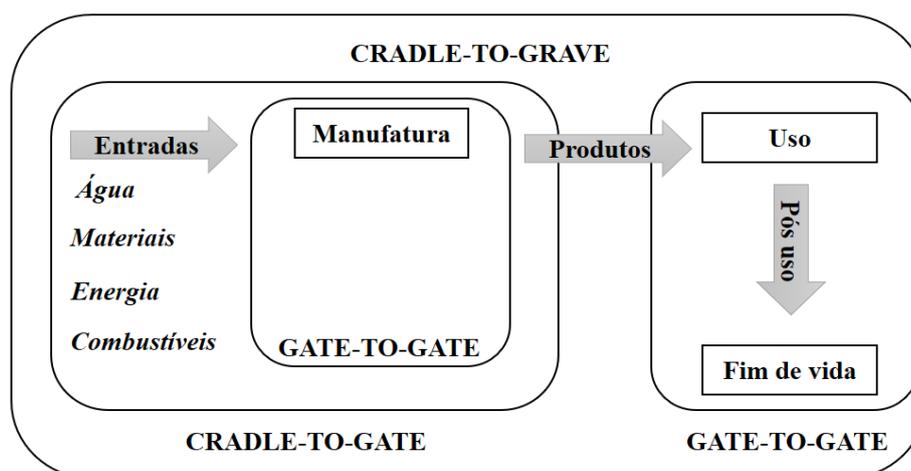
A unidade funcional é a definição de uma unidade de referência utilizada no sistema de produto para mensurar algum desempenho, sendo uma medida fundamental para comparação em base comum entre diferentes processos tecnológicos (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT 2009b). Medidas de massa, volume, unidade de produto são exemplos de unidade funcional.

O requisito de qualidade dos dados estabelece que deve ser priorizada a coleta de dados primários. Esses dados devem atender aos seguintes critérios: cobertura relacionada ao tempo de coleta de dados; cobertura geográfica e cobertura tecnológica; precisão; completude; representatividade; consistência; reprodutibilidade; fonte e incerteza dos dados (ISO, 2014).

O sistema de produto consiste em diversos processos elementares (menor elemento considerado na análise de inventário da Pegada Hídrica com fluxos elementares (material ou energia que interage diretamente com o meio ambiente, sem modificação humana) e também de produtos e coprodutos, que desempenham uma ou mais funções definidas no ciclo de vida do produto de interesse (ABNT, 2009b). As delimitações dos estudos de avaliação da Pegada Hídrica para efeito da definição dos limites do sistema de produto, podem ser (Figura 2):

- ***Cradle-to-grave*** (do berço ao túmulo): contemplam todos os processos desde a extração das matérias primas até o fim de vida do produto. Em estudos de avaliação da Pegada Hídrica esta abordagem e a abordagem *cradle-to-gate* são as mais adotadas;
- ***Cradle-to-gate*** (do berço ao portão da fábrica): abrange desde a extração de matérias primas até a manufatura dos produtos. Esta abordagem foi a adotada para este trabalho, conforme detalhamento ao longo da seção 3.2;
- ***Gate-to-gate*** (do portão ao portão da fábrica): normalmente, analisa as etapas de manufatura apenas. Abordagem comum, por exemplo, em estudos que envolvam comparações tecnológicas de processos de fabricação (SILVA et al., 2015);
- ***Gate-to-grave*** (do portão da fábrica ao túmulo): considera as etapas finais de distribuição e fim de vida do produto. Abordagem comum ao se comparar diferentes estratégias de fim de vida de produtos, por exemplo (SILVA et al., 2015).

FIGURA 2 - Tipos comuns de sistemas de produto adotados em estudos de ACV



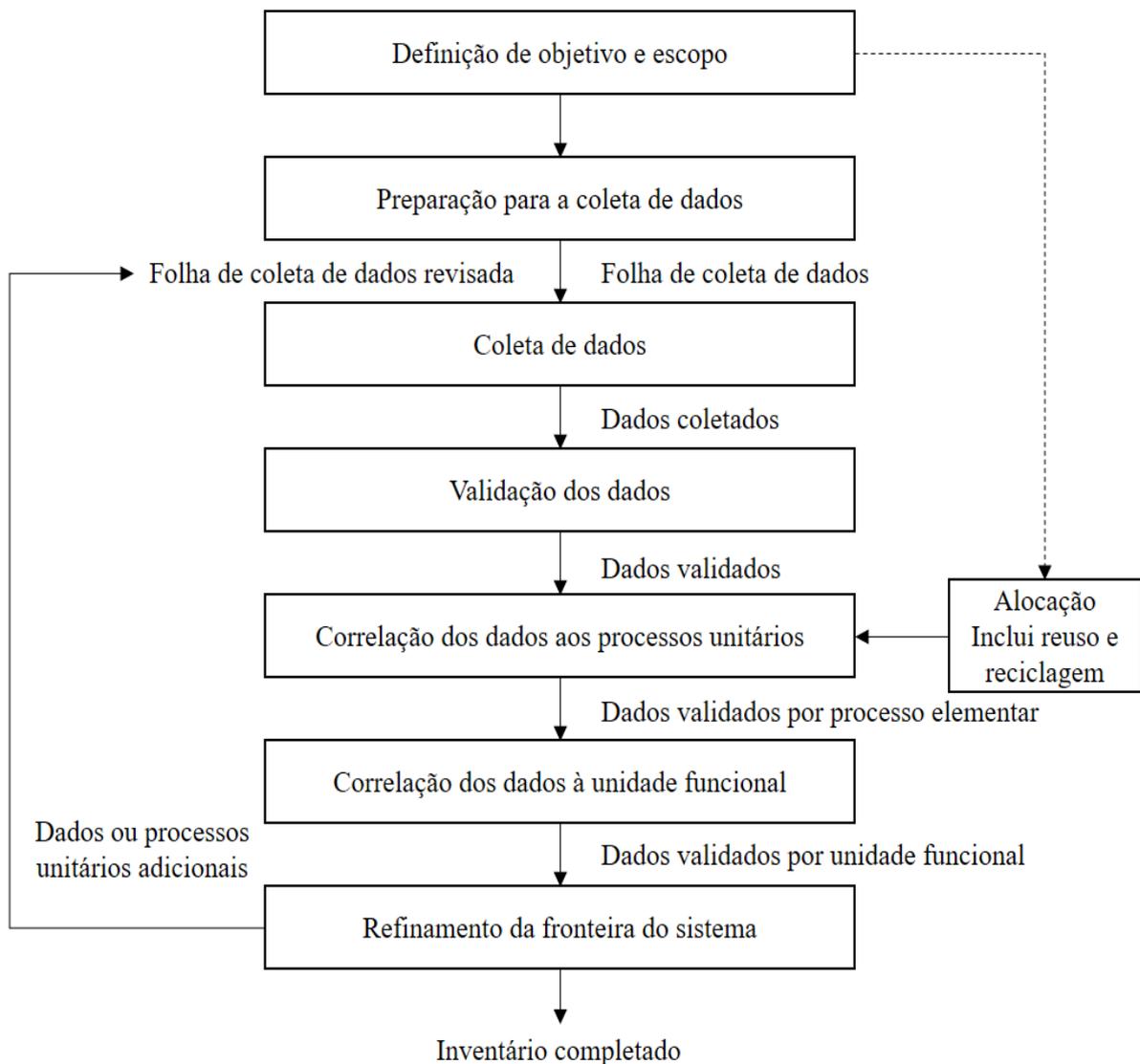
Fonte: SILVA et al. (2015).

### 2.1.2.2 Análise de inventário da Pegada Hídrica

A análise de inventário da Pegada Hídrica consiste na fase de coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar os fluxos de entradas e saídas do sistema de produto (ABNT, 2009a). Essa etapa ocorre de forma interativa, pois à medida que os dados são obtidos podem gerar mudanças no objetivo e escopo do estudo.

A norma ABNT 14044 (2009a) estabelece que devem ser coletados todos os dados relevantes de cada processo da fronteira do sistema, os cálculos devem ser realizados assim que obtidos de maneira a validá-los e devem ser correlacionados os dados aos processos elementares, fluxos de referência e estar em conformidade com a unidade funcional. Outro critério estabelecido é a utilização do processo de alocação, quando os fluxos utilizados em processos industriais que contemplam mais de um produto e estes são matéria-prima de produtos intermediários. A Figura 3 mostra as etapas para análise do inventário da PH.

FIGURA 3 - Procedimentos para análise de inventário da Pegada Hídrica



Fonte: ISO (2014).

De acordo com a norma ISO 14046:2014, os dados que representam fluxos elementares, podem ser obtidos a partir de processos elementares ou derivados de dados que representam

fluxos de material. Os critérios para coleta desses dados devem ser definidos de forma clara. Geralmente, as informações sobre os fluxos elementares relacionados a água devem incluir: quantidades de água usadas, tipos de recursos, características da qualidade da água, formas de uso, localização da retirada ou descarga de água, aspectos temporais e emissões geradas com impacto na qualidade da água.

Os cálculos do inventário da Pegada Hídrica devem seguir os procedimentos descritos na norma ABNT 14044. Nessa etapa os procedimentos de cálculos devem ser documentados, os dados devem ser validados durante o processo de coleta, e relacionados aos processos elementares, fluxos de referência e avaliados conforme a unidade funcional. Para o presente estudo, a descrição do inventário adotado durante a avaliação da Pegada Hídrica consta na seção 4.2.

Segundo a ABNT (2009a), a maioria dos processos na indústria não acontecem de forma isolada, ou seja, envolvem a produção de diversos produtos. O procedimento de alocação é empregado nesses sistemas, de forma que os impactos ambientais gerados possam ser repartidos entre os diferentes produtos. A alocação pode ser realizada considerando critérios físicos (massa ou energia) ou critérios econômicos (valor econômico do produto). Na presente dissertação, conforme detalhamento na seção 3.2.1.5, foi realizada alocação de impactos de forma a se lidar com a multifuncionalidade do sistema de produto da produção da carne de frango resfriada.

#### *2.1.2.3 Avaliação de impactos da Pegada Hídrica*

A avaliação de impacto utiliza os resultados obtidos através do inventário da Pegada Hídrica para avaliar a magnitude dos impactos hídricos potenciais. Essa etapa associa os dados obtidos no inventário com categorias de impacto específicas para então avaliar quais os impactos gerados por um processo (ABNT, 2009a).

A avaliação da Pegada Hídrica deve ser realizada conforme descrito na norma ABNT 14044. Esta fase inclui a coleta de resultados dos indicadores para as diferentes categorias de impacto. A avaliação de impactos hídricos consiste de elementos obrigatórios e opcionais. Os elementos obrigatórios são:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados do inventário às categorias de impacto selecionadas, tais como ecotoxicidade, toxicidade humana, eutrofização de água doce e escassez hídrica;

- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria.

A norma ISO 14046:2014 também cita elementos opcionais que podem ser utilizados dependendo do objetivo e escopo do estudo, sendo eles:

- Normalização: execução de cálculos da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria em relação a informação de referência;
- Agrupamento: consiste no agrupamento ou hierarquização das categorias de impacto;
- Ponderação: elemento que trata da conversão dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto;

Os potenciais impactos relacionados à água podem ser representados por um ou mais parâmetros de quantificação de impactos. O termo “Pegada Hídrica” só deve ser usado para avaliação abrangente, quando não avalia os impactos abrangentes deve ser identificado qual o parâmetro que será usado na etapa de avaliação de impactos do estudo, como, por exemplo, na avaliação de pegada de disponibilidade de água ISO (2014).

Os métodos de avaliação de impactos ambientais são desenvolvidos para auxiliar nos cálculos dos impactos ambientais que serão estudados. A etapa de avaliação de impacto da Pegada Hídrica é executada de forma semelhante a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) (ABNT, 2009a). Assim, deve-se identificar os fluxos elementares e relacioná-los as categorias de impacto ambientais, através de modelos de caracterização.

Muitos métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) estão disponíveis, congregando e harmonizando diversos modelos de caracterização na avaliação de um conjunto de categorias de impactos. Mendes et al. (2013) descrevem que os principais métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) são: CML; Eco-indicator 99; Ecological Scarcity; EDIP; EPS 2000; Impact 2002+; LIME; LUCAS; MEEuP; ReCiPe; TRACI; USEtox e IMPACT World+.

Os métodos de AICV são classificados em *midpoint* (ponto intermediário) e *endpoint* (ponto final) (MENDES; BUENO; OMETTO, 2013). Os métodos *midpoint* utilizam indicadores antes de chegar ao ponto final do mecanismo ambiental como eutrofização, ecotoxicidade, aquecimento global e outros. Os métodos *endpoint* relacionam os aspectos

ambientais com os danos finais, como impactos a saúde humana, recursos naturais e ecossistema (SILVA, 2012).

Num estudo de avaliação da Pegada Hídrica são analisados uma parcela desses impactos, ou seja, somente os relacionados ao uso da água (escassez hídrica, eutrofização de água doce, toxicidade humana e ecotoxicidade) (*Water Use Life Cycle Assessment* - WULCA, 2019).

No estudo de Castro et al. (2018) foi feita uma comparação de 12 modelos intermediários de caracterização para avaliação de impactos relacionados à escassez hídrica. Foram selecionados quais deles teriam melhor aplicação para o cenário brasileiro, uma vez que alguns fatores de caracterização globais podem indicar baixa escassez em locais que sofrem desse problema, como o caso do semiárido brasileiro. Nesse estudo, os modelos matemáticos *Water Stress Index* WSI e AWARE foram os mais bem avaliados para a realidade do país.

#### *Modelo de avaliação da Pegada de Escassez Hídrica (WSI)*

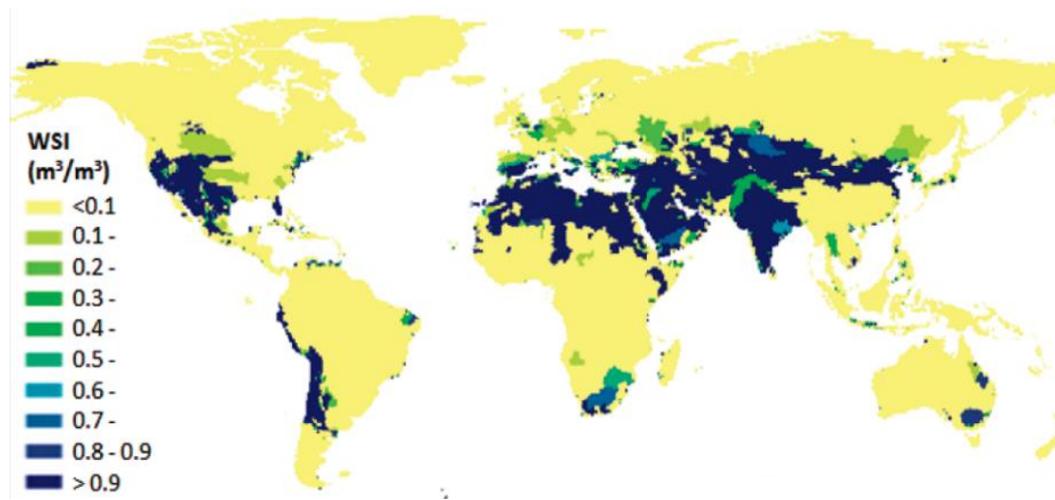
Um dos principais modelos de avaliação da pegada de escassez hídrica é o *water stress index* (WSI), proposto por Pfister et al. (2009), que avalia a escassez hídrica anual de acordo com a localização geográfica. O impacto hídrico de escassez é mensurado por um indicador a partir da relação entre o volume de água utilizado para atender à demanda humana e a disponibilidade de água numa bacia hidrográfica. A Equação 1 mostra como o *Withdrawal to Availability* (WTA) é mensurado, e a Equação 2 apresenta o cálculo do Fator de Caracterização (FC) WSI.

$$WTA = \frac{\textit{retirada de água anual}}{\textit{disponibilida de água anual}} \quad (1)$$

$$WSI = \frac{1}{1 + e^{-6.4 \times WTA} \left( \frac{1}{0.01} - 1 \right)} \quad (2)$$

A Figura 4 mostra um mapa dos fatores de caracterização, segundo o indicador de estresse hídrico (WSI) definido no estudo de Pfister et al. (2009), de acordo com o impacto por m<sup>3</sup> de água retirada em cada bacia hidrográfica das diferentes regiões do mundo.

FIGURA 4 - Mapa dos fatores de caracterização WSI para escassez hídrica



Fonte: PFISTER et al. (2009)

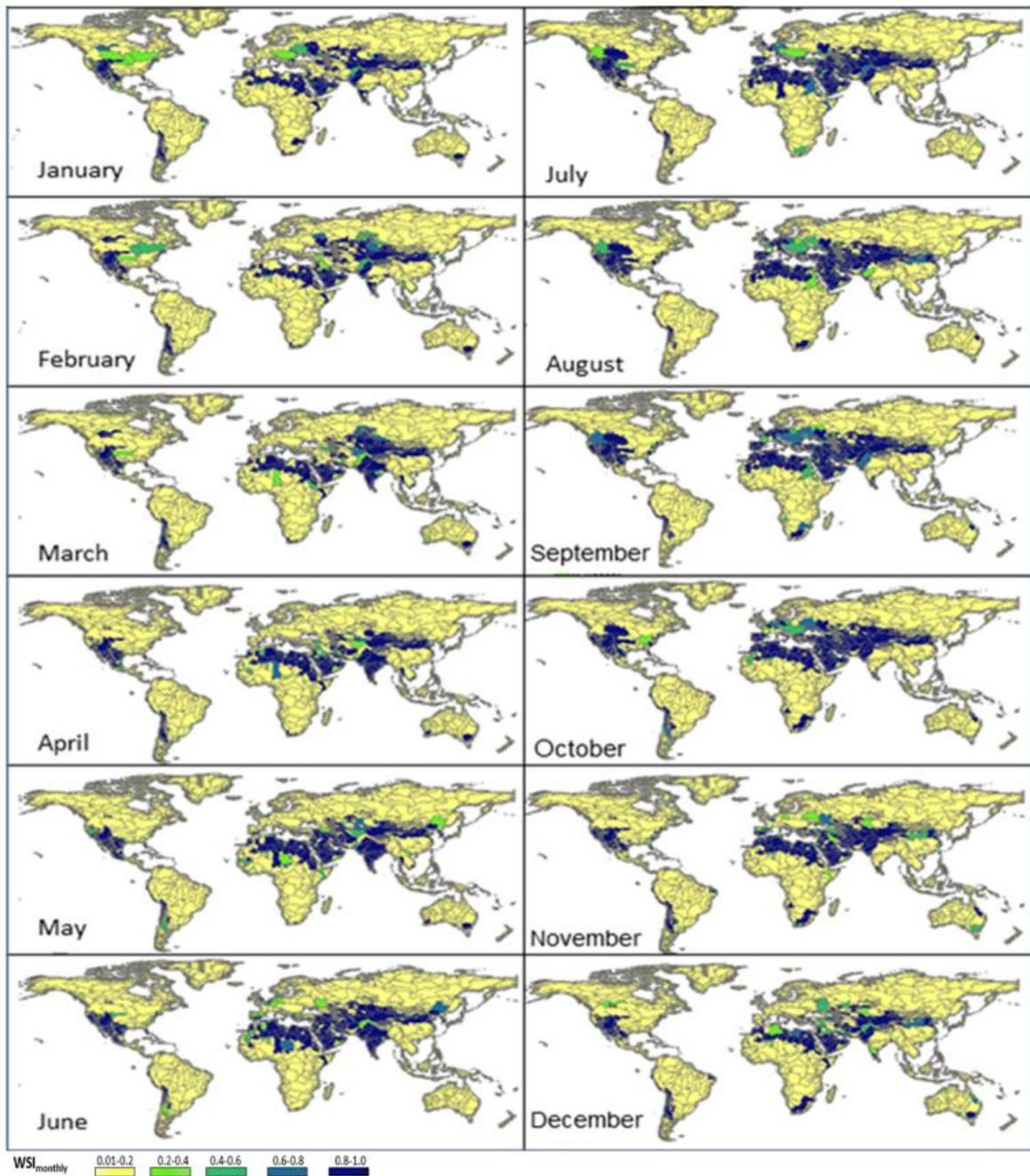
Posteriormente, Pfister e Bayer (2014) desenvolveram um índice de estresse hídrico ( $WSI_{\text{mensal}}$ ) dispondo do fator mensal para mais de 11.000 bacias hidrográficas do mundo. Basicamente, quanto maior o valor do indicador WSI, maior será a Pegada de Escassez Hídrica. O  $WSI_{\text{mensal}}$  inclui ainda um fator de variação fixo (VF), menor se comparado com o cálculo original do WSI (rever Equação 2). O componente VF foi modificado para refletir apenas a variabilidade interanual, sendo expresso pelo desvio padrão geométrico ( $s^*$ ) da precipitação anual durante (1961 e 1990). Sendo assim, a função logística foi ajustada para cada bacia hidrográfica e o fator “6,4” (Equação 2) foi substituído para “9,8” na avaliação mensal, conforme as Equações 3 e 4 a seguir:

$$WSI_{\text{mês}}(h) = \frac{1}{1 + e^{-9.8 \times WTA_{\text{mês}}^*(h) \left(\frac{1}{0.01} - 1\right)}} \quad (3)$$

$$WTA_{\text{mês}}^*(h) = s_{\text{ano}}^*(h) \times WTA_{\text{mês}}(h) \quad (4)$$

A Figura 5 mostra os mapas com o WSI mensal para cada uma das bacias hidrográficas estudadas, sendo possível observar que algumas regiões possuem grandes variações no WSI ao longo dos meses (PFISTER; BAYER, 2014).

FIGURA 5 - Mapa dos fatores de caracterização mensal, WSI para escassez hídrica



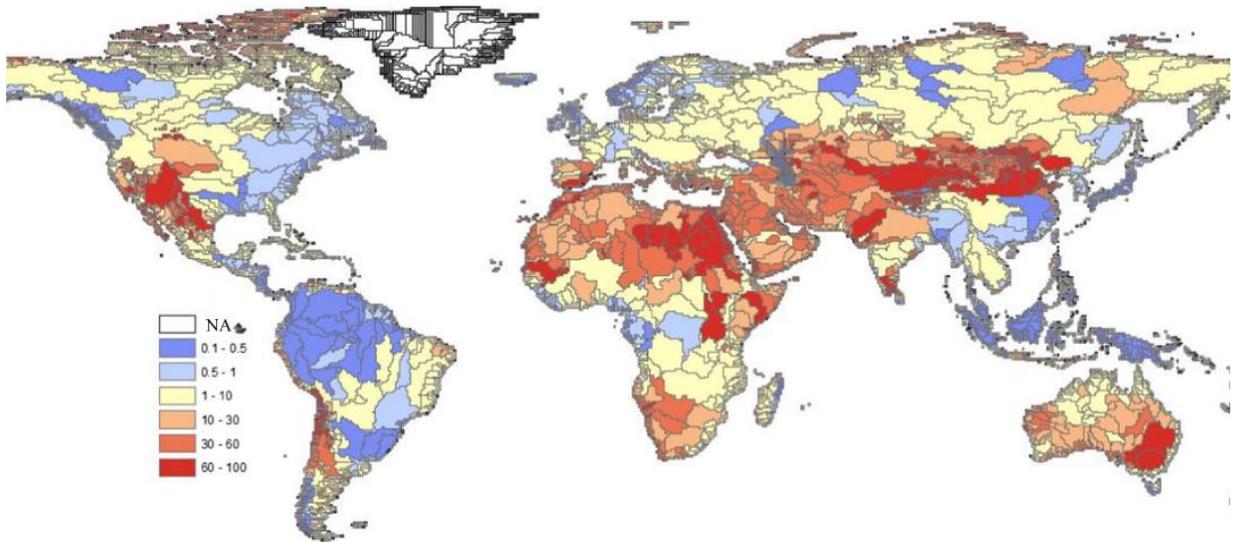
Fonte: PFISTER & BAYER (2014)

É importante frisar que no modelo WSI, o FC do Brasil é menor que 0,1 para quase todo o território nacional. Somente algumas áreas do país possuem um FC maior que 0,5. O FC que define a maior parte do país pode levar a interpretação que quase todo o território não passa por estresse hídrico, que não é a realidade vivida. Isso pode ser notado com o aumento das crises hídricas sofridas na região sudeste do Brasil, que possui a maior concentração de habitantes e as crises hídricas ocasionadas pelos grandes períodos de estiagem na região central do Brasil, além da histórica crise hídrica no Nordeste semiárido.

*Modelo de avaliação da Pegada de Escassez Hídrica (AWARE)*

O AWARE é um modelo de caracterização desenvolvido pelo grupo WULCA (BOULAY et al., 2018), que partiu da necessidade de avaliar a demanda de água tanto humana como do ecossistema. Este modelo avalia a quantidade de água disponível em um local após a demanda humana e do ecossistema ter sido atendida. Os dados do Fator de Caracterização (FC) mensais e anuais (média ponderada dos fatores mensais) estão disponíveis em planilhas no site <http://www.wulca-waterlca.org/aware.html>. A Figura 6 mostra a média anual do FC para atividades não agrícolas em diferentes regiões do mundo.

FIGURA 6 - Mapa dos fatores de caracterização anual, AWARE para escassez hídrica



Fonte: BOULAY et al. (2018).

O modelo de caracterização AWARE está baseado na disponibilidade menos a demanda de água por área pela área avaliada. O FC é calculado conforme as Equações 5 e 6, enquanto a Pegada de Escassez Hídrica (PEH), é medida pela Equação 7.

$$AMD = \frac{A - HWC - EWR}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (5)$$

$$FC = \frac{AMD_{global}}{AMD_{local}} \quad (6)$$

$$PEH = \text{Uso consutivo de água (m}^3\text{)} \times FC \quad (7)$$

O FC é dado pela divisão da AMD (*Avaliability Minus Demand*) global pela AMD local. O termo AMD refere-se à disponibilidade de água (A- *Avaliability*) menos a demanda humana (HWC-*Human Water Consumption*) e a do ecossistema (ERW-*Environmental Water Requirement*). Atualmente, o AWARE no contexto do Brasil é um modelo mais realístico, possuindo diferentes FC para as regiões do país. Isso pode ser notado ao analisar as regiões do Brasil que passaram por crises hídricas nos últimos anos e o FC dessas áreas no mapa.

Além dos modelos representados pelas equações 1 a 7 para estimativa da escassez hídrica utilizando os modelos WSI e AWARE, existem outros modelos que também podem ser utilizados ao se realizar uma avaliação da Pegada Hídrica, segundo a norma ISO 14046:2014.

#### *Modelo para avaliação de ecotoxicidade de água doce e da toxicidade humana (USETox)*

O modelo USEtox foi criado por um grupo de pesquisadores de diversos lugares do mundo no intuito de informar cientificamente e tecnicamente os impactos de diferentes substâncias químicas na saúde humana e nos ecossistemas. Portanto, esse modelo calcula os fatores de caracterização para toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce (ROSENBAUM et al., 2008). O modelo apresenta, em sua versão de 2008, a caracterização para 991 substâncias orgânicas para a categoria de toxicidade humana e 1.299 substâncias orgânicas para categoria de impacto ecotoxicidade de água doce (ROSENBAUM et al., 2008). O modelo USEtox é dado pela Equação 8, a seguir:

$$\overline{CF} = \overline{EF} \times \overline{XF} \times \overline{FF} \quad (8)$$

Onde CF corresponde ao fator de caracterização expresso em casos/kg<sub>emitido</sub>; EF são os efeitos gerados dado em casos/kg<sub>ingerido</sub> para toxicidade humana ou em PAF m<sup>3</sup>/ kg para ecotoxicidade, FF representa aos fatores sucessivos para o impacto no dia e XF representa a exposição ao componente químico em um dia, sendo esse valor utilizado somente para mensurar os impactos relacionados a toxicidade humana ( ROSENBAUM et al., 2008).

No estudo de Rosenbaum et al. (2008), os efeitos cancerígenos e não cancerígenos são somados e considerou-se o fator de ponderação como 1, que resulta em um unico fator de caracterização sendo ele expresso CTUh (unidades tóxicas comparativas). Para ecotoxicidade é estimado a fração de espécies potencialmente afetada (PAF) em determinado tempo por determinada quantidade de produto químico emitido sendo dada por PAF m<sup>3</sup> dia kg<sup>-1</sup>, que pode ser expresso em CTUe.

### *Modelo para avaliação da eutrofização de água doce no método ReCiPe*

O método ReCiPe refere-se a um método de avaliação de impactos que foi desenvolvido a partir da integração dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000 (MENDES et al., 2013) e que calcula fatores de caracterização para 18 categorias de impacto intermediárias e 3 de ponto final. Atualmente, para a categoria de eutrofização o ReCiPe está entre os principais métodos utilizados mundialmente para a estimativa de impactos potenciais tanto para eutrofização quanto para outras categorias de impacto (GOEDKNOOP et al., 2013; MENDES et al., 2013).

A categoria de eutrofização de água doce é representada no ReCiPe por meio da média das condições europeias, a partir do emprego do modelo CARMEN para emissões de nitrogênio (N) e fósforo (P) para o solo, para a água subterrânea e para a água doce superficial (MORELLI et al., 2018). O fósforo é fortemente retido pelo solo, sendo assim suas concentrações nas águas subterrâneas geralmente insignificantes. Porém, em áreas ocupadas pelo ser humano, a saída de fósforo ( $P_{saída}$ ) nas águas superficiais pode ser significativa e é geralmente ocasionada pela descarga de efluentes domésticos e industriais aos corpos hídricos. Assim, o modelo CARMEM adotado pelo método ReCiPe descreve a relação entre a carga de fósforo, taxa de erosão (R) e saída, como mostra a Equação 9.

$$P_{saída} = P_{entrada} (1 - e^{-bR}) \quad (9)$$

Na Equação 9, b é o coeficiente relacionado ao teor de solo erodido.

#### *2.1.2.4 Interpretação dos resultados da avaliação da Pegada Hídrica*

Uma vez concluídas as etapas de definição de objetivo e escopo (seção 2.1.2.1), análise de inventário (seção 2.1.2.2), e avaliação dos impactos (seção 2.1.2.3), a última etapa do estudo de avaliação da Pegada Hídrica envolve a interpretação dos resultados alcançados. Assim, segundo a norma ISO (2014), essa interpretação dos resultados deve:

- Identificar questões relevantes a partir dos resultados (*hotspots* ambientais);
- Realizar verificações de integridade, sensibilidade e consistência dos resultados;
- Considerar os aspectos geográficos e temporais para a tomada de decisões;
- Estabelecer as conclusões e limitações do estudo;

- Realizar avaliação quantitativa ou qualitativa das incertezas;
- Considerar a avaliação de sensibilidade dos resultados.

Na presente dissertação de mestrado, esta etapa de interpretação dos resultados foi realizada conforme resultados que serão discutidos ao longo da seção 4. Para isso, o estudo se baseou em cálculos de ecoeficiência a partir dos resultados da avaliação da Pegada Hídrica. Nesta etapa também, foram propostas e a sugeridas melhorias relevantes para a redução dos *hotspots* ambientais identificados visando o aumento da competitividade da empresa e do setor da economia avaliado por esta pesquisa.

Sobre a ecoeficiência, a seção 2.3 abordará uma revisão sobre o assunto. E, a seguir, a seção 2.2 desenvolve uma discussão sobre estudos de Pegada Hídrica realizados no Brasil.

## 2.2 ESTUDOS SOBRE A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA NO BRASIL

### 2.2.1 Avaliação da Pegada Hídrica no Brasil

Para melhor compreender os estudos de Pegada Hídrica que foram desenvolvidos no Brasil, foi feita uma busca nas bases de dados Scopus, Web of Science (WoS) e Scielo até agosto de 2019, a partir do termo “*water footprint*” e selecionados todos os artigos publicados pelo Brasil. Nesta primeira busca foram identificados 60 artigos e por meio da leitura de títulos e resumos, foram selecionados 28 estudos que abordaram a Pegada Hídrica em sistemas produtivos (Quadro 1).

QUADRO 1 - Avaliação da Pegada Hídrica para diferentes setores/produtos do Brasil.

SETORES /PRODUTOS	AUTORES
<b>Biocombustíveis</b>	(FACHINELLI; PEREIRA JR, 2015)
	(CHICO; SANTIAGO; GARRIDO, 2015)
	(HERNANDES; BUFON; SEABRA, 2014)
	(RODRIGUEZ et al., 2018)
	(SOUSA et al., 2017)
	(MEKONNEN et al., 2018)
<b>Cana de açúcar</b>	(SCARPARE et al., 2016a)
	(SCARPARE et al., 2016b)
	(SILVA et al., 2015)
	(BARBOSA et al., 2017)

<b>Produção de suínos</b>	(SCHNEIDER; HELENA; CARRA, 2016)
	(PALHARES, 2014)
	(PALHARES, 2011)
<b>Usina hidroelétrica</b>	(VIEIRA et al., 2018)
	(COELHO et al., 2017)
	(BUENO; MELLO; ALVES, 2016)
<b>Soja</b>	(COSTA et al., 2018)
	(LATHUILLIÈRE et al., 2014)
<b>Refeições universitárias</b>	(STRASBURG; JAHNO, 2015)
	(STRASBURG; JAHNO, 2017)
<b>Cebola</b>	(MATOS et al., 2017)
<b>Celulose</b>	(EMPINOTTI; TADEU; MARTINS, 2013)
<b>Leite</b>	(PALHARES; PEZZOPANE, 2015)
<b>Manga</b>	(CARNEIRO et al., 2018)
<b>Melão amarelo</b>	(DE FIGUEIRÊDO et al., 2014)
<b>Bovino</b>	(CESAR et al., 2017)
<b>Camarão branco</b>	(WOJCIKIEWICZ et al., 2017)
<b>Óleo de palma</b>	(MUNASINGHE; JAYASINGHE; DERANIYAGALA, 2019)

Fonte: Elaborado pela autora.

Nessa análise, foi possível constatar que os estudos sobre Pegada Hídrica no Brasil focam principalmente (mais de 50%) em produtos agrícolas e pecuários, sendo 04 deles aplicados na produção de cana de açúcar, 03 na criação de suínos, 02 na produção de soja e outros que se destinaram a criação de bovinos, de camarão, de leite, de manga, de melão e de cebola.

A maior fatia dos estudos, 06 deles, foram direcionadas para produção de biocombustíveis, sendo eles originados a partir da cana de açúcar (CHICO; SANTIAGO; GARRIDO, 2015); (FACHINELLI; PEREIRA JR, 2015); (SCARPARE et al., 2016a); da soja (RODRIGUEZ et al., 2018); do milho (MEKONNEN et al., 2018); e de sebo bovino (SOUSA et al., 2017). Outros 03 estudos foram aplicados no sistema de produção de energia de hidroelétricas, 02 buscaram avaliar a Pegada Hídrica em refeições universitárias e 01 estudo foi destinado a Pegada Hídrica da produção da celulose.

Também foram avaliados os modelos aplicados para a avaliação da Pegada Hídrica dos processos descritos no Quadro 1, somente 03 deles utilizaram a abordagem da ISO 14046:2014 em seus estudos, sendo: (CARNEIRO et al., 2018); (DE FIGUEIRÊDO et al., 2014); e (SOUSA et al., 2017). Outros 03 utilizaram a metodologia da água virtual dada por (CHAPAGAIN;

HOEKSTRA, 2003), sendo eles: (HELENA; CARRA; SCHNEIDER, 2015); (PALHARES, 2014) e (PALHARES, 2011). Outros 22 artigos utilizaram o indicador de avaliação da Pegada Hídrica dada por (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011), a partir da abordagem WFN. Portanto, a maior parte dos estudos nacionais estão ainda focados na abordagem WFN (rever seção 2.1.1), em contrapartida à ISO 14046:2014. Especificamente sobre a Pegada Hídrica da produção da carne de frango, a seção 2.2.2 apresenta os principais estudos identificados até o momento.

### **2.2.2 Estudos de avaliação ambiental da carne de frango**

Alguns estudos de ACV da carne de frango focaram-se na etapa de criação e engorda dos frangos nos aviários (PAYANDEH, 2017; LEINONEN et al., 2012; PELLETIER, 2008), outros estendem a avaliação até a saída da carne de frango do matadouro (DA SILVA et al., 2012; GONZÁLES-GARCIA et al., 2014; WIDEMANN, 2017). Foi identificado um estudo que avalia a cadeia produtiva desde a engorda das aves até o uso do produto final (uso doméstico) (SKUNCA, 2018). Os estudos que avaliaram os impactos ambientais gerados na fase de engorda dos frangos (aviários) foram os mais numerosos.

Foram identificados estudos de ACV que abordaram diversas categorias de impacto, principalmente, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas, acidificação e demanda cumulativa de energia (PELLETIER, 2008; WEIDEMANN, 2017; LOPEZ-ANDRES, 2017; PUTMANN, 2017). Alguns estudos incluíram impactos associados ao uso da água como eutrofização (DA SILVA et al., 2014; CESARI, 2017), ecotoxicidade de água doce (PAYANDEH, 2017) e estresse hídrico (PFISTER et al., 2009; Weidemann 2017), porém não focaram na avaliação da Pegada Hídrica como proposto pela ISO 14046:2014. Por fim, esses estudos focaram principalmente realizados com foco nos impactos associados às mudanças climáticas e ao uso de energia.

Os estudos sobre avaliação da Pegada Hídrica da carne frango utilizaram a metodologia WFN (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011), por exemplo, como os estudos feitos por OCAK; ÖĞÜN; EMSEN (2014); IBIDHI et al. (2017); TSOLAKIS; SRAI; AIVAZIDOU (2018). Dessa forma, os estudos que avaliam os impactos hídricos, como sugere a ISO 14046:2014 ainda são escassos na literatura, o que motivou a realização da presente pesquisa.

## **2.3 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA**

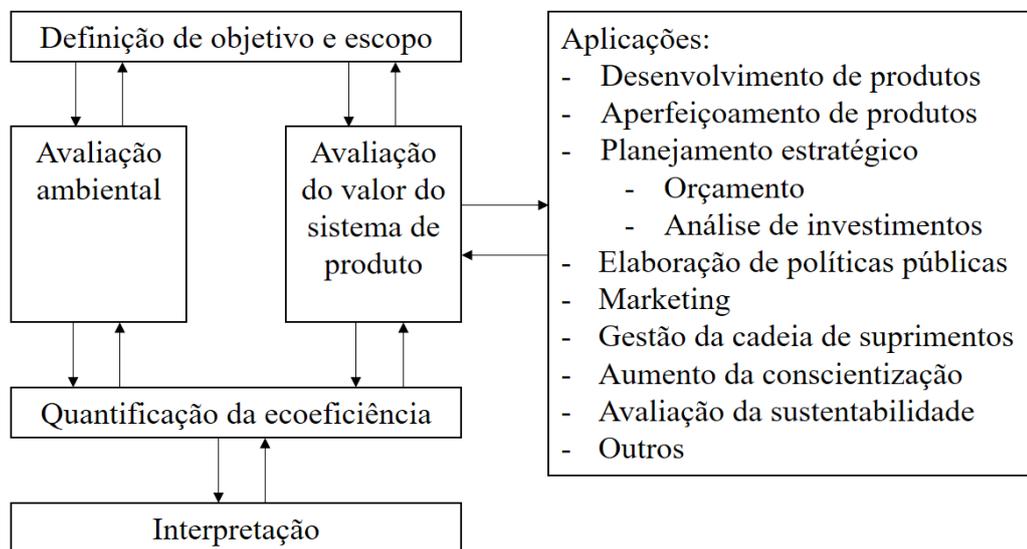
A gestão do ciclo de vida de produtos proposta no guia *da United Nations Environment Programme* - UNEP (2007) é um sistema de gestão desenvolvido para facilitar a adoção de práticas

sustentáveis nas organizações. O guia contempla além da utilização da ACV, a proposta de diversas outras técnicas e ferramentas, como a avaliação da Pegada Hídrica e a avaliação da ecoeficiência.

A ecoeficiência surgiu com o intuito de relacionar quesitos socioeconômicos aos quesitos ambientais, através da interação entre impacto ambiental e valor da produção de bens e serviços. A ecoeficiência busca maximizar os resultados de um recurso econômico, melhorar a eficiência ecológica e mensurar desses dois critérios para melhoria econômica e ecológica do processo ou produto estudado (KICHERER et al., 2007).

A avaliação da ecoeficiência é uma ferramenta de gestão quantitativa que estuda o valor do sistema de produto em conjunto com os impactos ambientais do ciclo de vida, sendo os impactos ambientais obtidos por meio da ACV. Quanto ao valor do sistema do produto esse pode ser baseado na eficiência dos recursos, da produção, entre outros. Pela norma ISO 14045:2012 a avaliação de ecoeficiência é realizada em cinco fases, sendo elas: definição do objetivo e escopo, avaliação ambiental, avaliação do valor do sistema do produto, quantificação da ecoeficiência e interpretação (Figura 7).

FIGURA 7 - Fases para avaliação da ecoeficiência - ISO 14045:2012



Fonte: ISO (2012).

A ecoeficiência aparece no manual da UNEP (2007) no quesito de indicadores para a sustentabilidade, pois como fora definido pelo *World Business Council For Sustainable Development - WBCSD* (1995), a ecoeficiência objetiva correlacionar o valor dos produtos com os seus respectivos impactos ambientais, gerando indicadores de desempenho segundo a Equação 10.

$$Eco = \frac{\text{valor do produto}}{\text{impacto ambiental}} \quad (10)$$

O “valor do produto” para Verfaillie e Bidwell (2000), pode ser expresso pela quantidade de um ou mais produtos comercializados num período (mês, ano), ou pela receita/lucro no período, ou ainda pelos custos evitados/minimizados para a produção do(s) produto(s) em questão. Já o “impacto ambiental” representa um ou mais tipos de impactos ambientais associados aquela geração de valor do produto.

Para a ISO 14040 (2009a), a geração de resíduos e efluentes, assim como consumo de recursos são considerados como aspectos ambientais. Os impactos são definidos como escassez hídrica, eutrofização, mudanças climáticas e outros. Portanto, para aumentar a ecoeficiência num sistema produtivo é necessário agregar mais valor aos produtos e/ou reduzir o impacto ambiental por unidade de produto posto no mercado. Contudo, até o momento não foram encontrados na literatura estudos focados tanto em Pegada Hídrica como em ecoeficiência, o que também foi uma motivação para este estudo.

O cálculo do indicador “*Eco*” da Equação 10 pode auxiliar uma empresa em saber exatamente onde melhorar, e quais insumos e processos que geram mais impactos e também agregam menos valor na produção, e, portanto, são pouco ecoeficientes. Além disso, se apresenta como uma forma simples para uso nas empresas como indicador de desempenho e poderia ser facilmente implementada na indústria.

Através da aplicação do estudo de caso na produção de dez tipos de pesticidas, Zhu, Wang, Zhang (2014) utilizaram a ACV para mensurar os impactos ambientais desses produtos e avaliar a ecoeficiência de cada um deles. Concluíram que o pesticida deltametrina foi o produto mais ecoeficiente e as substâncias diclorvós e clorpirifos foram os menos ecoeficientes. Van Middelaar et al. (2011) realizaram um estudo sobre a ecoeficiência na produção de queijo holandês, avaliando os impactos por meio da ACV. Concluíram que a produção de leite na fazenda agregou mais valor econômico ao produto e o armazenamento foi o processo menos ecoeficiente.

Sobre a utilização da ecoeficiência, não foram encontrados estudos com foco no objeto de pesquisa desta dissertação, isto é, no processamento industrial da carne de frango no Brasil. Portanto, a ecoeficiência combinada ao estudo da avaliação da Pegada Hídrica em sistemas de manufatura ainda é um tópico a ser explorado na literatura atual.

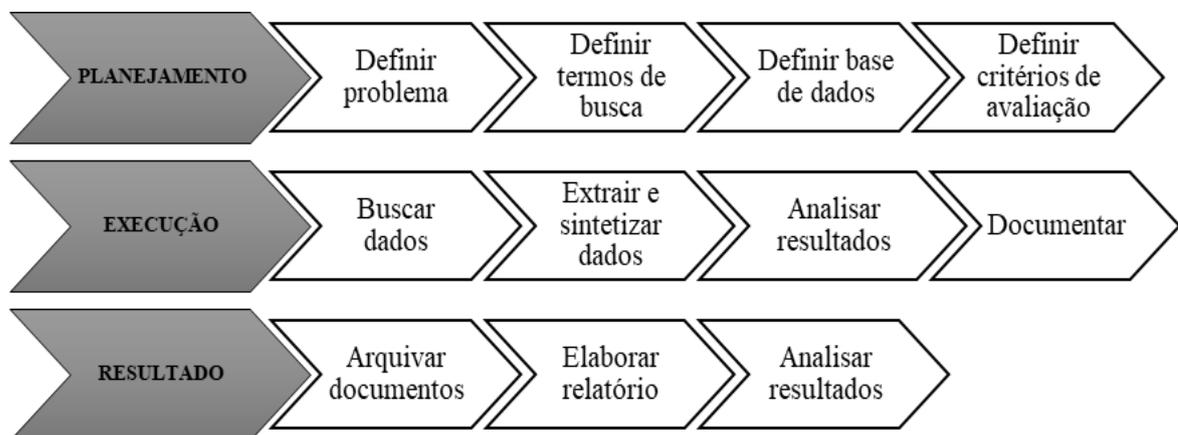
### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias adotadas na realização deste estudo. Quanto à natureza, este estudo pode ser classificado como uma pesquisa aplicada; quanto à abordagem do problema foi feita uma pesquisa quantitativa e qualitativa; quanto aos objetivos, caracteriza-se como pesquisa exploratória; e quanto aos procedimentos técnicos, foi feita uma pesquisa bibliográfica, documental, seguida de estudo de caso (GIL, 2002).

#### 3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA E BIBLIOMETRIA

A revisão da literatura foi realizada através do método da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) do tema de pesquisa, conforme resultados que serão apresentados na seção 4.1. Nesta etapa foi possível identificar quais estudos publicados avaliaram a Pegada Hídrica de processos e produtos manufaturados e quais métodos foram aplicados neste contexto. Estudos sobre a ecoeficiência e o uso da água também foram mapeados nesta revisão, quando encontrados. A Figura 8 mostra o fluxograma dos procedimentos executados para a realização da revisão bibliográfica.

FIGURA 8 - Fluxograma dos procedimentos realizadas para a revisão da literatura



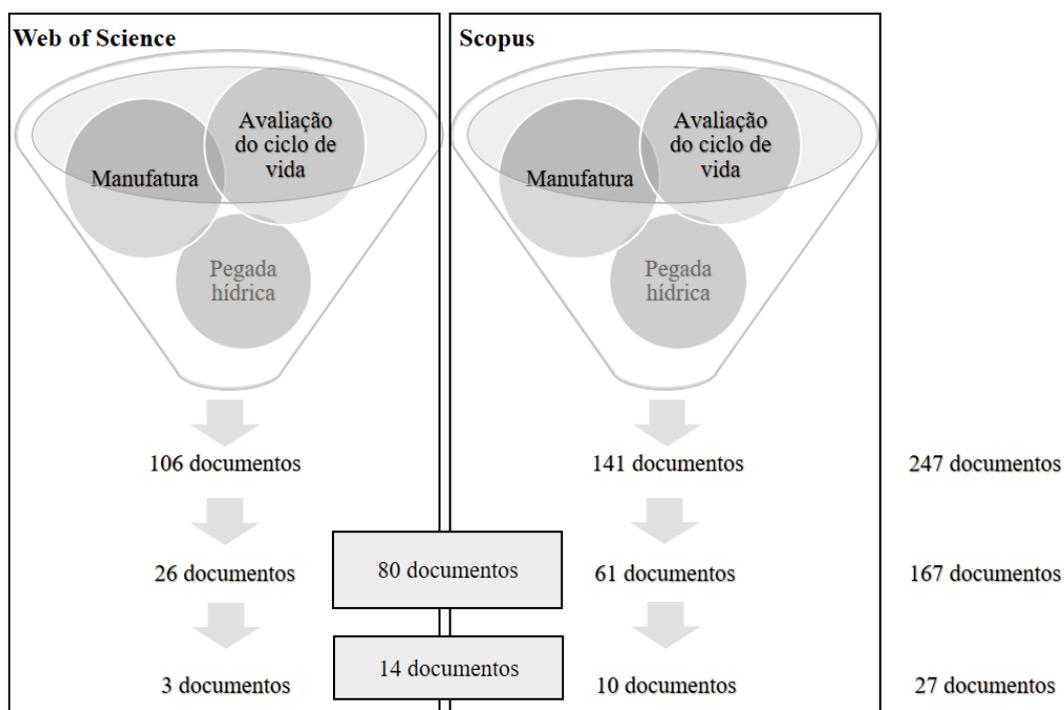
Fonte: Elaborado pela autora.

Essa revisão foi realizada seguindo três etapas: planejamento da revisão, a execução e a análise dos resultados. Na primeira etapa foi definido o problema de pesquisa, os termos de busca, as bases de dados a serem utilizadas, os critérios de seleção e avaliação dos estudos, e como seria realizada a extração e a síntese dos resultados. Também foi definido os tipos de documentos que seriam estudados, e qual o período de análise das publicações e o idioma dos textos.

A revisão sistemática da literatura e a pesquisa bibliométrica foram realizadas nas bases de dados da Scopus e Web of Science (WoS) sobre a atual produção científica relacionada a estudos envolvendo a Pegada Hídrica aplicados à sistemas de manufatura. A análise bibliométrica buscou identificar quais os principais autores, tipos de documentos (artigos em periódicos e em conferências), instituições (empresas, instituições de pesquisa e universidades), revistas científicas e países responsáveis pela maior parcela dos estudos da área. Em seguida, realizou-se a classificação dos artigos mais relevantes dentro dessa temática, com base no número de citações.

A revisão sistemática englobou todos os documentos publicados até outubro de 2018 nas já citadas bases de dados. Não houve restrições quanto ao idioma adotado e aos tipos de documentos publicados no período de análise. Depois, foram definidas as palavras-chave mais utilizadas para mapear as publicações da área, sendo essa etapa realizada com base na leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. As palavras-chave foram divididas em três grupos de busca, que depois foram combinadas com o operador booleano “AND”, como mostra o Anexo B. A Figura 9 apresenta como foram feitas as buscas e a quantidade de documentos encontrados nas duas bases de dados.

FIGURA 9 - Fluxograma das etapas de seleção dos documentos dentro da WoS e da Scopus



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram quantificados 247 documentos nas duas bases de dados, 106 na base da WoS e 141 na base da Scopus, sendo 80 documentos presentes em ambas as bases. Dessa forma, quantificou-se 167 documentos para a etapa de qualificação dos documentos. Posteriormente, foram selecionados os 27 documentos que aplicaram o estudo da Pegada Hídrica em algum sistema de manufatura ou que avaliaram algum produto manufaturado.

A etapa de qualificação consistiu na identificação dos autores mais citados e mais cocitados e dos documentos com maior número de citações, por meio da análise bibliométrica. Para finalizar, foi feita uma análise minuciosa dos documentos que aplicaram exclusivamente a ferramenta de Pegada Hídrica em algum sistema de manufatura, segundo alguma das abordagens metodológicas discutidas ao longo da seção 2.1. A parte da pesquisa bibliométrica foi essencial para conhecimento do tema de pesquisa, sua relevância, qual o rumo das pesquisas realizadas neste contexto, visto que essa análise identifica os principais autores, documentos, o crescimento do tema ao longo dos anos.

A escolha pela temática de Pegada Hídrica em sistemas de manufatura se deve ao fato de atualmente a maior parcela dos estudos de Pegada Hídrica no Brasil e no exterior estarem restritos ao setor agropecuário. No entanto sistemas de manufatura também podem causar impactos ambientais adversos devido ao uso da água e sua poluição, conforme Northey; Haque; Mudd (2013); Calderón et al. (2010); Pfister; Saner; Koehler (2011). Por fim, para efeito desta dissertação se entende como sistema de manufatura o conjunto de processos de transformação (manuais, semi e/ou completamente automatizados) que processam e transformam matérias primas e insumos brutos em produtos acabados ou semiacabados prontos para consumo ou distribuição, conforme proposto por MacCarthy & Fernandes (2000).

### 3.2 O ESTUDO DE CASO – AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA E PEGADA HÍDRICA

A parte prática da pesquisa foi realizada através da aplicação da avaliação da Pegada Hídrica conforme a norma ISO 14046:2014. O objeto de estudo foi a produção de carne de frango de uma empresa de grande porte situada no centro oeste brasileiro, seguida da sua avaliação de ecoeficiência com base na norma ISO 14045:2012. Para isso, foram feitas visitas técnicas e coletas de dados em campo, *in loco*, através de observação e entrevistas para viabilizar principalmente a etapa de inventário e mapeamento de processos.

O protocolo para realização do estudo de caso seguiu a proposta de Yin (2015), conforme o Anexo C.

### 3.2.1 Definição de objetivo e escopo

A definição de objetivo e escopo foca no planejamento do estudo de avaliação da Pegada Hídrica, seguida da análise de ecoeficiência. Ambas as normas ISO 14046:2014 e 14045:2012, apresentam a etapa de definição de objetivo e escopo como primeira fase de seus processos. Assim, a seguir são elencados os principais aspectos definidos para esta fase da pesquisa tendo em vista o objeto de estudo escolhido.

Primeiro, via revisão da literatura, foram analisados os setores produtivos que possuem grande potencial para gerar impactos aos recursos hídricos, ou seja, empresas que utilizam altos volumes de água em seus processos e no descarte de efluentes. Nessa etapa, foi feita a seleção de dois setores produtivos para estudo: o setor alimentício e o setor químico, visto que muitos dos produtos são à base d'água e necessitam de grande quantidade de água para limpeza e sanitização das estruturas, dos equipamentos e das ferramentas utilizadas. Detalhes sobre a escolha desses setores são apresentados nos resultados da seção 4.1.

Depois disso, foram enviadas, via e-mail, uma carta de apresentação para realização do estudo de caso (Anexo D) para diversas empresas. O principal objetivo de envio da carta foi adquirir apoio e parceria para coleta de dados e realização de estudo no ambiente fabril identificado. Com o retorno dos e-mails foi selecionado uma empresa avícola, localizada no estado de Goiás, para aplicação do estudo de caso. O sistema produtivo definido foi selecionado devido à retirada de altos volumes de água para utilização e consumo durante o abate das aves. Outras empresas também foram consultadas neste processo inicial do planejamento do estudo, porém, foram descartadas devido à falta de interesse/disponibilidade em colaborar com a pesquisa, especialmente quanto a coleta e disponibilização de dados para o inventário da Pegada Hídrica e posterior avaliação da ecoeficiência.

No caso do sistema produtivo analisado, considerou-se como produto de interesse a carne de frango inteiro resfriado, uma vez que esse é principal produto da empresa em termos de vendas direta para o mercado consumidor ou como fonte de matéria prima para outros produtos, como os cortes da carne de frango.

A motivação para realização deste estudo foi melhor conhecer os aspectos e impactos ambientais do ciclo de vida do mesmo, e então, propor melhorias que visem tornar a produção mais ecoeficiente na empresa estudada. Uma outra motivação para este estudo é a possibilidade de fornecer dados para a realidade do Brasil quanto a Pegada Hídrica da produção do frango

inteiro resfriado, uma vez que este produto é parte relevante na alimentação humana e para o setor alimentício do país. Como detalhado na revisão de literatura da seção 2, são poucos os estudos envolvendo a Pegada Hídrica de produtos manufaturados no Brasil, e para o caso da carne de frango, ainda não foram encontrados estudos do gênero, e tão pouco, que envolvessem a avaliação da ecoeficiência.

O público-alvo deste estudo são os usuários da avaliação da Pegada Hídrica no contexto de ACV, a própria empresa estudada, e empresas que atuem no mesmo ramo ou em ramos similares. A conclusão deste estudo pode auxiliar outros pesquisadores e empreendedores que buscam alternativas para melhorar a eficiência dos recursos hídricos nos sistemas produtivos. Portanto, os resultados deste estudo serão relatados para a empresa estudada e para o meio acadêmico, por meio desta dissertação e publicações derivadas em revistas científicas.

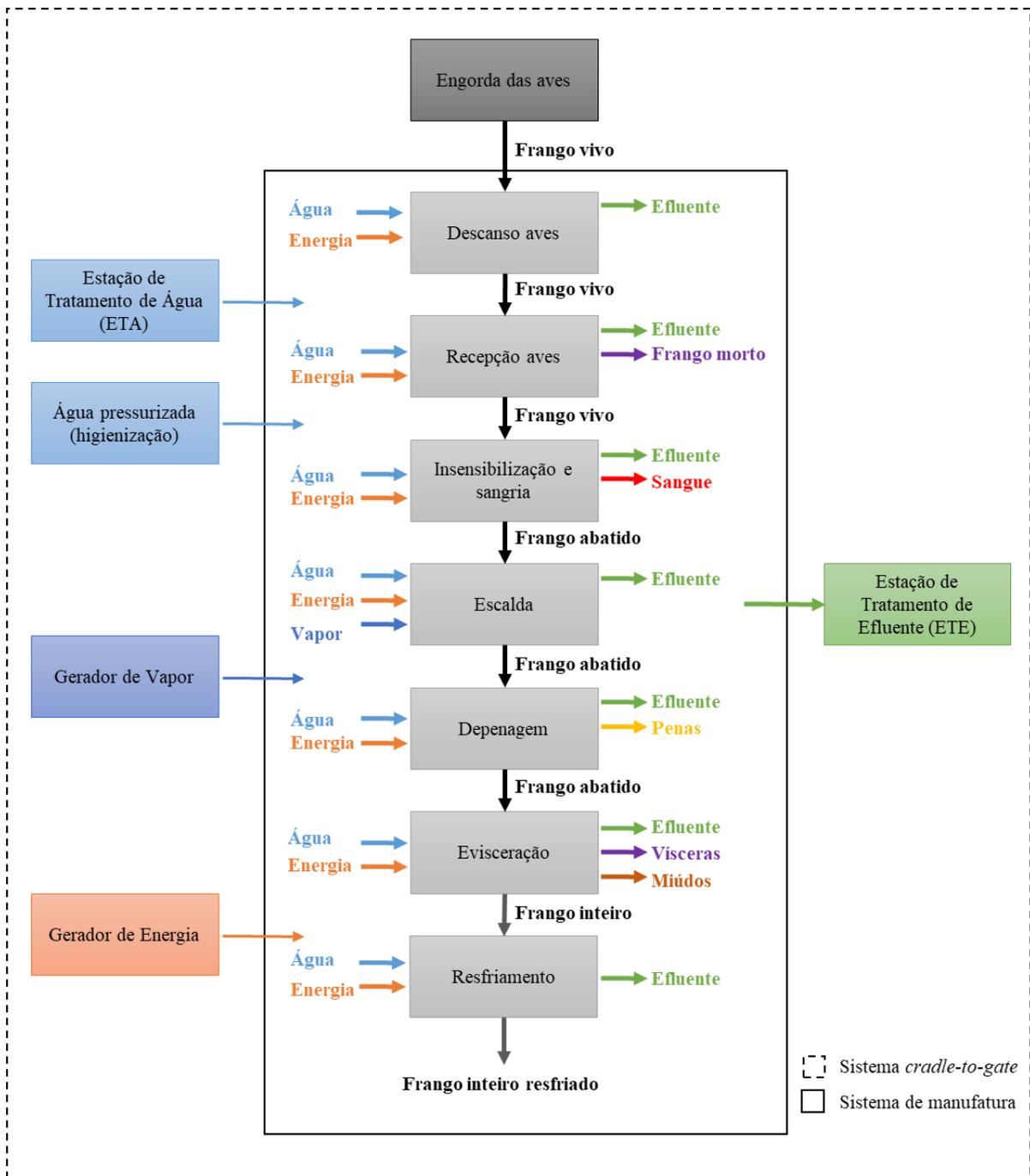
#### *3.2.1.1 Definição do sistema de estudo, fronteira do sistema e unidade funcional*

Este estudo foi aplicado em uma planta de abate e processamento de carne de frango de grande porte, que abate cerca de 330 mil aves por dia. A empresa localiza-se no centro-oeste do Brasil, sendo uma das dez maiores empresas brasileiras no ramo, com quadro de mais de 4 mil colaboradores.

A cadeia produtiva do frango é extensa e envolve diversos processos de fabricação. A empresa estudada controla todos os sistemas envolvidos na produção de carne de frango, sendo eles: fábrica de rações, matrizeiros, incubatório, aviários de engorda e processamento (atividade de manufatura). Para esse estudo foram analisados os processos de entrada: Estação de Tratamento de Água (ETA), Estação de Geração de Vapor, produção de água pressurizada (higienização) e Estação de Tratamento de Efluente (ETE).

A seguir são apresentados os processos elementares para o sistema de produto escolhido, associado a produção do frango inteiro resfriado, e os seus principais fluxos de entrada e saída (Figura 10).

FIGURA 10 - Processos elementares considerados para efeito da definição do sistema de produto – processamento do frango inteiro resfriado



Fonte: Elaborado pela autora.

O processo de manufatura para produção do frango inteiro resfriado ocorre por meio dos seguintes processos elementares: descanso das aves, recepção das aves, insensibilização e sangria, escaldagem, depenagem, evisceração e resfriamento.

O processo de engorda das aves inicia com a entrada dos pintos de cortes aos aviários e finaliza 45 dias depois. Durante a engorda, as aves são tratadas pela equipe técnica da própria empresa, sendo que essa tem a função de auxiliar na vacinação, aplicação de medicamentos, controle de temperatura e umidade, alimentação e demais atividades que irão influenciar no crescimento e engorda das aves e, conseqüentemente, na qualidade do produto final. Ao final do processo de engorda no aviário, o frango vivo adquire um peso médio de 2,85 kg.

Antes de serem abatidos, os frangos devem descansar em um espaço com ventilação e umidificação. Nesse espaço os caminhões carregados de frango ficam estacionados, na espera para o descarregamento dos frangos na plataforma de recepção.

Na plataforma de recepção das aves, as gaiolas (caixas de plástico que seguram as aves durante o transporte) são retiradas e colocadas de forma suave em duas esteiras. Uma esteira recebe as aves fêmeas e a outra recebe as aves macho, separando-as pela média de peso. As aves são retiradas das gaiolas e presas através das patas nos transportadores aéreos (nórias).

Antes do abate, a ave deve passar por um processo de insensibilização, que consiste no atordoamento do animal poucos segundos antes da morte. A insensibilização não pode causar a morte do animal, somente atordoá-lo. Na empresa, essa etapa é feita por eletronarcose, que acontece por meio da imersão da ave com aplicação de uma corrente elétrica que passa por sua cabeça até os pés e gera o atordoamento.

A sangria inicia-se pelo corte da veia jugular da ave através de um disco afiado. Após o corte da jugular, as aves permanecem penduradas até que seja removido quase todo o sangue presente no animal, e isso leva cerca de três minutos. O sangue removido segue através de tubulações subterrâneas até a fábrica de subprodutos, onde é utilizado como insumo na produção da farinha de penas e sangue. Depois de removido o sangue é realizada a remoção das penas, que acontecem em duas etapas: escaldagem e depenagem.

A escaldagem acontece por meio da imersão das aves em um tanque com água a uma temperatura entre 54°C à 64°C, afrouxando as penas e facilitando o processo de depenagem. A depenagem consiste na retirada das penas das aves, com auxílio de equipamentos que possuem milhares de dedos de borracha. Esse processo utiliza a água de forma contínua. As penas removidas caem em tubulações subterrâneas e são levadas até a fábrica de subprodutos onde são utilizadas para a produção de farinha de penas e sangue.

Depois ocorre o processo de corte dos pés do frango e os frangos são direcionadas por uma esteira até a evisceração. Os pés passam por um processo de limpeza e seleção, os pés fora do padrão de qualidade são destinados para a fábrica de subprodutos.

Para finalizar a limpeza da carcaça de frango é feita a remoção das vísceras, não comestíveis, e dos miúdos (coração, moela e fígado). Os resíduos desse processo e a água residual são lançadas em calhas que levam para a fábrica de subprodutos, onde são transformadas em farinha de vísceras e óleo de vísceras. Ao final da evisceração é feita a limpeza das carcaças com jatos de água (1,5 litros por carcaça) antes de seguir para o processo de resfriamento.

Ao sair da evisceração, a carcaça encontra-se a uma temperatura de 40°C, o pré-resfriamento deve reduzir essa temperatura para aproximadamente 13°C. Isso é feito pela imersão das carcaças em tanques de água a uma baixa temperatura para limpeza, resfriamento e hidratação do produto. Ao todo, esse processo dura cerca de 25 minutos e o tanque deve ser abastecido constantemente com água gelada e gelo, sendo estabelecido o mínimo de 1,5 litros de água por carcaça no pré-resfriamento e 1 litro de água por carcaça no resfriamento.

A higienização da empresa é feita em três períodos distintos. Dois processos de limpeza são realizados durante a parada do processo produtivo. Nesses processos, a higienização é feita somente com aplicação de água quente pressurizada em todos os equipamentos da empresa e estrutura física. A terceira limpeza é realizada ao final do processo produtivo, com uso de água quente pressurizada e produtos de limpeza como: limpa piso (decapan), espuma alcalina e hipoclorito de sódio.

A água utilizada nos processos de manufatura segue para a estação de tratamento físico-químico de efluente. Essa estação recebe unicamente os efluentes gerados no processamento da carne de frango e no processamento de subprodutos, para não comprometer biologicamente o óleo e o lodo gerado, uma vez que esses são coprodutos para produção de biodiesel e adubo orgânico, respectivamente.

A estação de tratamento físico químico de efluentes utiliza produtos químicos (sulfato de alumínio isento e polímero aniônico) em conjunto com equipamentos de equalização e flotação para separação dos sólidos contidos no efluente. Nessa estação, além do tratamento do efluente também é feito o tratamento do lodo, que após cozido e centrifugado, gera o óleo residual e o lodo seco.

Sendo assim, foi definido que a Unidade Funcional (UF) adotada para este estudo seria a produção de um quilograma (kg) de frango inteiro resfriado. A modelagem do sistema de produto descrito na Figura 10 foi realizada com auxílio do software openLCA versão 1.7, e do bando de dados Ecoinvent versão 3.3 para a modelagem *cradle-to-gate* do sistema produtivo, incluindo os processos e fluxos à a montante. O Quadro 2 resume os processos elementares adotados para a modelagem da avaliação da Pegada Hídrica e o Quadro 3 resume os processos auxiliares adotados na modelagem como atividades de apoio à manufatura do produto (ex: higienização e o tratamento de efluentes).

QUADRO 2 - Processos adotados na modelagem da avaliação da Pegada Hídrica de 1 kg de frango inteiro resfriado

PROCESSO ELEMENTAR	ENTRADAS	FONTE DE DADOS		
		Tipo	Base de dados	Descrição do processo à montante ou comentário sobre o fluxo primário
Descanso de aves	Frango vivo	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>chicken production / chicken for slaughtering, live weight / cut-off, U - GLO</i>
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada
Recepção de aves	Frango	Primário	Entrevista	Proveniente da Descanso de aves
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada
Insensibilização e sangria	Frango	Primário	Entrevista	Proveniente da Recepção de aves
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada
Escaldagem	Frango	Primário	Entrevista	Proveniente da Insensibilização e sangria
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada
	Vapor	Primário	Entrevista	Geração de vapor
Evisceração	Frango	Primário	Entrevista	Proveniente da Escaldagem
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada
Resfriamento	Frango	Primário	Entrevista	Proveniente da Evisceração
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix / electricity, high voltage / cut-off, U - BR</i>
	Água de processo	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Água de higienização	Primário	Entrevista	Água pressurizada

Fonte: Elaborado pela autora

QUADRO 3 – Outros processos adotados na modelagem da avaliação da Pegada Hídrica de 1 kg de frango inteiro resfriado

PROCESSO ELEMENTAR	ENTRADAS	FONTE DE DADOS		
		Tipo	Base de dados	Descrição do processo à montante ou comentário sobre o fluxo primário
Engorda das aves	<i>Electricity</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>market group for electricity, high voltage   electricity, high voltage   cut-off, U - GLO</i>
	<i>Energy feed</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>market for energy feed, gross   energy feed, gross   cut-off, U – GLO</i>
	<i>Heat</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>market group for heat, district or industrial, other than natural gas   heat, district or industrial, other than natural gas   cut-off, U – GLO</i>
	<i>Poultry manure</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>poultry manure, fresh, Recycled Content cut-off   poultry manure, fresh   cut-off, U - GLO</i>
	<i>Protein feed</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>market for protein feed, 100% crude   protein feed, 100% crude   cut-off, U - GLO</i>
	<i>Shed</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>market for shed   shed   cut-off, U – GLO</i>
	<i>Water</i>	Secundário	Ecoinvent 3.3	
Estação de Tratamento de Água (ETA)	Água superficial	-	-	Proveniente do Rio das Pedras
	Sulfato de alumínio	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>aluminium sulfate production, powder   aluminium sulfate, powder   cut-off, U – RoW</i>
	Polímero aniônico	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>anionic resin production   anionic resin cut-off, U – RoW</i>
	Cloro	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>chlorine production, liquid   chlorine, liquid   cut-off, U – GLO</i>
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U – BR</i>
Estação de Tratamento de Efluente (ETE)	Água	Primário	Entrevista	Água tratada – BR
	Efluente bruto	Primário	Entrevista	Proveniente do processo produtivo do frango inteiro resfriado
	Sulfato de alumínio	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>aluminium sulfate production, powder   aluminium sulfate, powder   APOS, U – RoW</i>
	Polímero aniônico	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>anionic resin production   anionic resin   APOS, U – RoW</i>
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U – BR</i>
Água pressurizada	Água	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA
	Eletricidade	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>Electricity, high voltage, production mix   electricity, high voltage   cut-off, U – BR</i>
Gerador de vapor	Lenha de eucalipto	Secundário	Ecoinvent 3.3	<i>roundwood, eucalyptus ssp. from sustainable forest management, under bark</i>
	Água	Primário	Entrevista	Proveniente da Estação de Tratamento de água – ETA

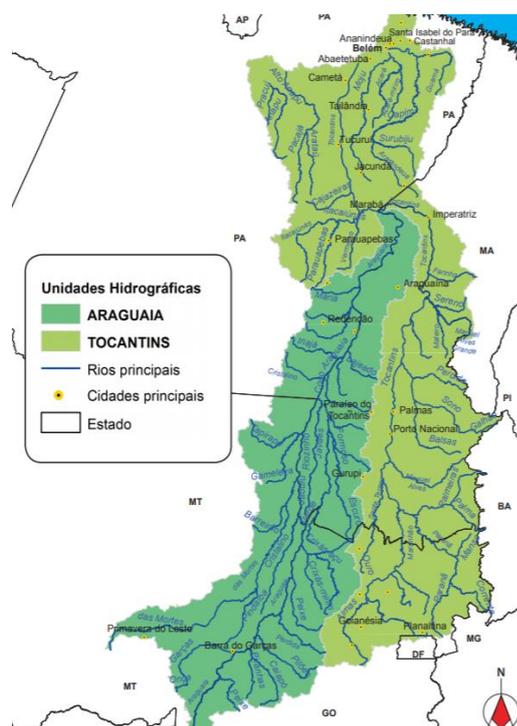
Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2.1.2 Cobertura temporal e geográfica

O sistema de produção analisado contempla desde o recebimento do pinto de corte no aviário de engorda até a produção do frango inteiro resfriado. No que tange a cobertura geográfica, este estudo foi determinado pelas características locais da empresa. Assim, o estudo foi desenvolvido em uma empresa avícola localizada no centro oeste do Brasil conforme detalhes na Figura 11.

Toda a água utilizada na empresa é proveniente unicamente de água superficial (rio próximo a empresa), ele desagua no Rio das Almas, um dos principais afluentes do Rio Tocantins, que compõe a bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia (Figura 11). Segundo ANA (2019), a bacia Tocantins-Araguaia, representa 10,8% do território brasileiro, que abrange os estados Goiás, Mato Grosso, Pará, Maranhão e Tocantins.

FIGURA 11 - Bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia



Fonte: ANA (2015).

Quanto a cobertura temporal, os dados primários utilizados foram delimitados ao período de coleta de dados, que se iniciou em janeiro de 2018 e finalizou em janeiro de 2019, um total de 12 meses. Já os dados secundários foram coletados a partir da base de dados Ecoinvent 3.3, para os seguintes horizontes temporais:

- *electricity:1984 - 2046*
- *roundwood eucalyptus:2000 - 2017*
- *chicken production: 1994 - 2017*
- *aluminium sulfate:1995 - 2017*
- *anionic resin:1997 - 2020*
- *chlorine:2000- 2017*
- *sodium hypochlorite: 1997 – 2017*

Portanto, os dados secundários adotados na modelagem representam uma média com aproximadamente 30 anos de informações.

### 3.2.1.3 *Requisitos de qualidade dos dados*

Os dados referentes ao consumo de água e descarte da água residual nos processos de processamento da carne de frango foram adquiridos por meio de entrevistas com funcionários da empresa estudada e por meio da consulta de documentos de controle do volume de água captado e do volume e qualidade do efluente devolvido ao corpo hídrico de captação.

A água captada passa por processo de tratamento em cinco estações compactas de tratamento de água, que possuem capacidade de tratar 480 m<sup>3</sup> de água por hora. Todo o efluente gerado no complexo industrial é descarregado no mesmo manancial de captação, acima do ponto de captação. Antes de retornar ao rio, o efluente passa por tratamento físico-químico e, posteriormente, por tratamento biológico em duas lagoas anaeróbias e duas lagoas facultativas. O processo de tratamento físico químico foi modelado no software openLCA como processo complementar à atividade de manufatura, ou seja, do processamento do frango inteiro resfriado.

No tratamento físico-químico ocorre a maior remoção da carga de poluentes, nesta etapa é feita a extração do lodo, que depois de processado gera dois novos subprodutos: o óleo residual e o lodo seco. O óleo residual é comercializado para a produção de biocombustíveis e o lodo seco é destinado para compostagem para produção de adubo orgânico. A Tabela 1 apresenta as características do efluente bruto, efluente após tratamento físico químico (tratado I) e após o tratamento biológico (tratado II).

TABELA 1 - Características da água residual após tratamento do efluente

Análise	Unidade	Bruto	Tratado I	Tratado II
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L	4.603,54	295,11	76,50
DQO – Demanda Química de Oxigênio	mg/L	9.069,65	614,65	245,64
Sólidos Totais	mg/L	2.513,33	-	640,00
Óleos e Graxas	mg/L	2.355,00	-	<10
Oxigênio Dissolvido	mg/L	2,80	-	5,32
Ferro Dissolvido	mg/L	0,29	-	<0,10
Fósforo Total	mg/L	16,85	-	1,00
Nitrogênio Amoniacal	mg/L	67,20	-	18,48
Nitrogênio Total	mg/L	87,30	-	55,19

Fonte: Empresa estudo de caso.

No sistema de produto, a água é usada de forma direta em todos os processos da manufatura. Considerando que a quantidade de aves abatidas ao longo do ano é homogênea, as oscilações no volume de água captada ao longo do ano foram assumidas irrelevantes.

#### 3.2.1.4 Definição do critério de corte

Neste estudo foram desconsiderados os bens de capital como estruturas físicas, equipamentos e maquinários adotados pela indústria, considerando o longo tempo de vida útil desses bens. Os bens pessoais como alimentação, transporte de funcionários, materiais administrativos, uniformes também foram excluídos.

#### 3.2.1.5 Procedimentos de alocação

O frango inteiro resfriado pode ser considerado como um produto multifuncional, uma vez que este gera diversos outros produtos (pés de frangos, miúdos e coprodutos sangue, penas, vísceras, além do produto escolhido para sistema de produto analisado (frango inteiro resfriado). Durante os processos de produção do frango inteiro resfriado, outros produtos também são gerados.

De acordo o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT (2014) a alocação serve para dividir as quantidades de entradas e saídas entre os diversos produtos, de forma a resolver o problema da multifuncionalidade. A alocação pode ser feita com base em referências físicas e/ou econômicas, tais como o poder calorífico dos produtos, a massa, preço de mercado dos produtos, etc. Para este trabalho foram considerados os critérios mássico e econômico para alocação (Tabela 2).

TABELA 2 - Percentuais de participação dos produtos na produção de 1 kg de frango inteiro resfriado.

Processos	Produtos	Quantidade		Alocação	
		Kg	R\$/kg	Mássica	Econômica
Sangria	Frango	2,85	4,20	97,50%	99,89%
	Sangue	0,07	0,18	2,50%	0,11%
Depenagem	Frango	2,78	4,20	90,00%	93,73%
	Pés	0,10	7,49	3,50%	6,00%
	Penas	0,19	0,18	6,50%	0,27%
Evisceração	Frango	2,49	4,20	87,50%	94,08%
	Miúdos	0,09	6,83	3,10%	5,42%
	Vísceras	0,25	0,22	8,90%	0,50%

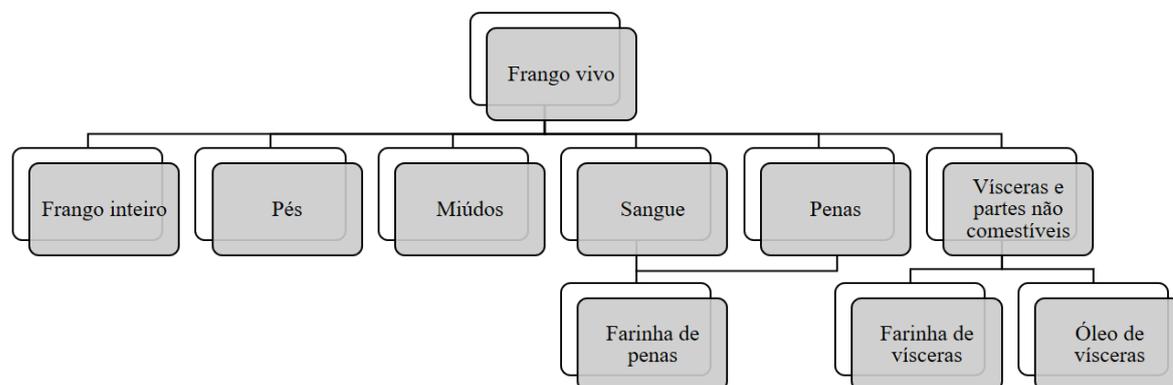
Fonte: Empresa estudo de caso.

A comparação dos percentuais para alocação mássica e econômica mostra que é relevante comparar os dois critérios, visto que os percentuais mássicos e econômicos dos produtos estudados não são semelhantes, como mostra a Tabela 2. Para a alocação econômica, a empresa parceira deste estudo forneceu os dados de valor econômico de cada um dos produtos originados do sistema de produção do frango inteiro resfriado.

O valor econômico dos produtos foi dado pelo preço médio de venda dos diferentes produtos que são destinados para os mercados nacionais e internacionais. Um exemplo foi o preço médio dos pés de frango que obteve o maior percentual econômico no processo de depenagem, dado que esse produto tem valor econômico relevante no mercado internacional.

A Figura 12 apresenta todos os produtos e coprodutos gerados no sistema de produto do frango inteiro resfriado.

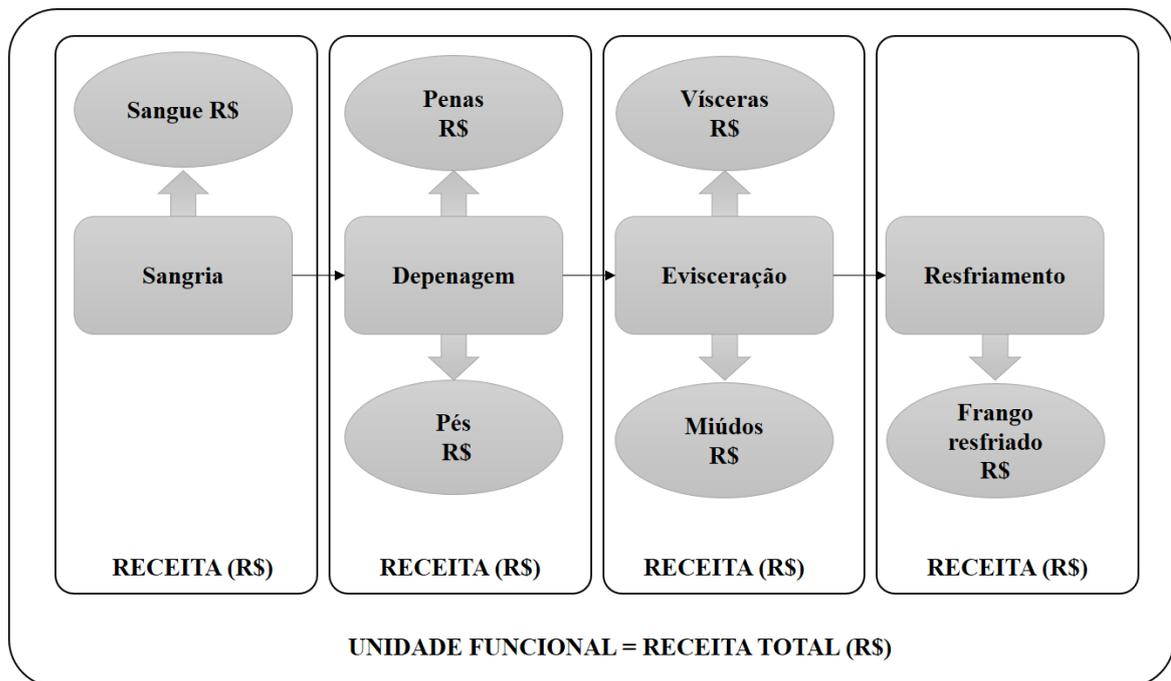
FIGURA 12 - Produtos e coprodutos gerados na produção do frango inteiro



Fonte: Elaborado pela autora.

Além de empregar os procedimentos de alocação mássica e econômica neste trabalho, conforme ISO 14040:2009, antes de se empregar a alocação deve-se tentar evita-la por meio do emprego de procedimentos técnicos tais como a subdivisão e a expansão do sistema. Para contornar o uso de alocação uma alternativa tomada neste estudo foi adotar a unidade funcional monetária (R\$) para o sistema de produto estudado, conforme apresenta a Figura 13.

FIGURA 13 - Procedimento para evitar uso da alocação no sistema de produto estudado – expansão do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

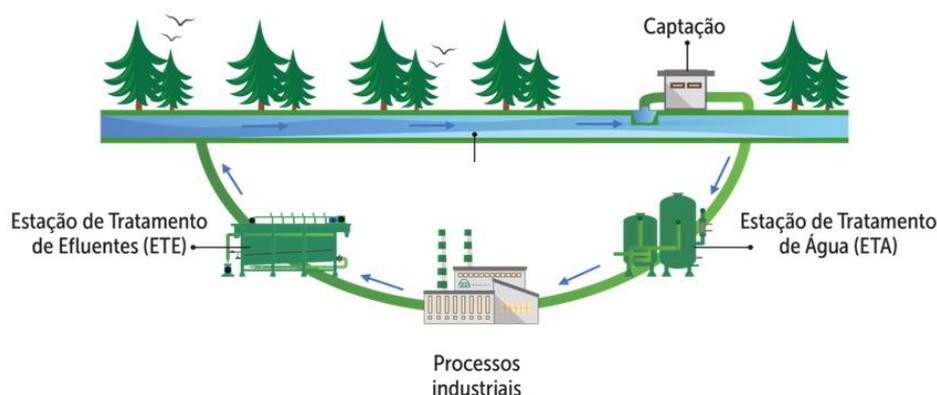
Na seção 4.4.3, serão apresentados resultados da avaliação da Pegada Hídrica alocando e evitando a alocação para efeito de discussão dos resultados e análise dos *hotspots* ambientais. No entanto, vale ressaltar que o cenário da Figura 13 adotou como unidade funcional a receita total de R\$336.935.129,59 para o ano de 2018, em contrapartida aos cenários alocados da Tabela 2, onde os percentuais mássicos e econômicos apresentados partiram da unidade funcional igual a 1 kg de frango inteiro resfriado somente.

Concluída a etapa de planejamento do estudo a partir da definição de objetivo e escopo, as seções 3.2.3 e 3.2.3, a seguir apresentam as principais ações tomadas relativas às etapas de análise de inventário e avaliação dos impactos potenciais do ciclo de vida do produto, respectivamente.

### 3.2.2 Análise do inventário da Pegada Hídrica

Os inventários da Pegada Hídrica do processamento do frango inteiro resfriado foram realizados seguindo os princípios de conservação da matéria, conforme a realização de balanços de massa e energia de cada processo. Foram mensurados todos os fluxos de entrada e todos os fluxos de saída. O fluxo de água que entra no sistema, não foi considerado elementar, uma vez que passa por tratamento físico-químico para atender aos parâmetros de qualidade da água utilizada por frigoríficos. O fluxo de saída de efluente também passa por tratamento físico-químico e biológico antes de retornar ao manancial de captação, para atender as normas de despejo de efluentes industriais em corpos hídricos, estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/11. O fluxo da água na empresa segue como mostrado na Figura 14.

FIGURA 14 - Fluxo da água e do efluente na empresa estudada



Fonte: Empresa estudo de caso.

Os demais fluxos de inventário foram mapeados e serão apresentados na seção 4.2.

### 3.2.3 Avaliação de impacto da Pegada Hídrica e tipos de impactos

Os impactos hídricos deste estudo foram avaliados com apoio do software openLCA 1.7. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto relacionadas a água: eutrofização de água doce, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce e escassez hídrica. Para a avaliação do impacto de eutrofização foi utilizado o método hierárquico de ponto médio do ReCiPe (GOEDKOOP et al., 2013). Para toxicidade humana e para ecotoxicidade de água doce foi escolhido o modelo de caracterização USETox (ROSENBAUM et al., 2008) e para categoria de impacto de escassez de água foi utilizado o modelo AWARE (BOULAY et al., 2018), por todos estes serem recentemente atualizados e recomendado internacionalmente.

### 3.2.4 Interpretação dos resultados

Depois de avaliados os impactos potenciais mensurados, a última etapa do estudo foi a interpretação dos resultados para cada uma das categorias de impacto escolhidas. Todos os resultados de cada categoria de impacto foram coletados e analisados por meio de planilhas e gráficos, para identificar quais os processos elementares mais impactantes aos recursos hídricos.

Para compreender as modificações que ocorrem quando alterado a metodologia do cenário atual (situação de referência) foi realizada a análise de sensibilidade, apresentada na seção 3.2.4.1. Depois disso, foram propostos novos cenários de melhorias para comparação com o cenário atual, como mostra a seção 3.2.4.2 de análise de cenários. A situação de referência (cenário atual) refere-se à produção de 1 kg de frango inteiro resfriado, a partir do critério de alocação mássica.

#### 3.2.4.1 Análise de sensibilidade

Nesta etapa foram realizadas as seguintes modificações metodológicas:

- Adoção do critério de alocação econômica, nessa etapa foram analisados quais os resultados de impacto hídrico para o sistema de estudo adotando os percentuais apresentados na Tabela 2;
- Associando os impactos do cenário atual ao tempo de processamento da atividade de engorda das aves ao tempo da atividade de manufatura para produzir 1kg de frango inteiro resfriado, baseado nos estudos de Kellens et al. (2012a, b);
- Adoção da receita (R\$) como unidade funcional para remover o critério de alocação da avaliação da Pegada Hídrica. Para tanto, adotou-se como unidade funcional a receita total anual na venda de todos os produtos produzidos pela empresa (frango inteiro resfriado e demais coprodutos, baseado em uma das unidades funcionais adotadas no estudo de Nemecek et al. (2011);

#### 3.2.4.2 Análise de cenários

Para análise de cenários foram identificados e modificados os valores de consumo dos fluxos mais impactantes, sendo criado os seguintes cenários:

- **Cenário 1:** redução de 30% do consumo de energia no sistema de manufatura analisado no sistema de referência;
- **Cenário 2:** redução de 40% da água utilizada na higienização e redução de 20% da água utilizada em todos os processos elementares;
- **Cenário 3:** redução de 30% do consumo de energia, redução de 40% da água destinada para higienização e 20% do uso de água nos processos elementares.
- **Cenário 4:** alteração do FC para estimativa dos impactos para a categoria de PEH via modelo AWARE, considerando o emprego de diferentes FC para diferentes regiões do Brasil, como proposto por Andrade et al. (2019).
- **Cenário 5:** inclusão da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) ao estudo para avaliar os impactos que o efluente não tratado pode acarretar ao meio ambiente e a redução de impactos que esse sistema pode promover.

É importante frisar que os cenários 1 a 3 foram traçados a partir da consulta de metas de melhoria contínua estabelecidas pela empresa estudada para os próximos anos. Logo, tais percentuais são viáveis de serem praticados e estão alinhadas as possíveis melhores práticas que futuramente poderão ser adotadas no setor estudado.

Além disso, para a avaliação de escassez hídrica foi feita a análise da planta estudada para diferentes localizações geográficas, ou seja, considerando diferentes fatores de caracterização pelo modelo AWARE. O cenário atual (situação de referência) foi calculado com FC do Brasil, que é igual a 2,17 atualmente. Para análise de outros FCs nacional, adotou-se o FC de diferentes regiões do Brasil, por meio do estudo de Andrade et al. (2019).

A inclusão da ETE foi tomada como outro cenário, uma vez que as empresas podem diferenciar quanto a adoção dos sistemas de tratamento de efluentes ou podem terceirizar esse serviço para empresas especializadas. Como a empresa objeto de estudo controla essa operação, o processo de ETE foi incluso como um quinto cenário. Essa inclusão buscou avaliar quais são as modificações dos resultados de impacto para cada uma das categorias estudadas.

### 3.3 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

Por fim, os resultados de cada uma das categorias de impacto previamente apresentadas foram associados ao valor do produto para mensurar a ecoeficiência dos processos produtivos

do frango inteiro resfriado. Os cenários de melhoria da seção 3.2.4 também foram incluídos durante a avaliação da ecoeficiência segundo a ISO 14045:2012.

O valor do produto utilizado na avaliação da ecoeficiência se deu pelo valor dos produtos que são destinados para o mercado alimentício e dos coprodutos que são destinados para a produção de ração. Os impactos ambientais acarretados pelo uso da água foram determinados por meio da avaliação da Pegada Hídrica, conforme discutido ao longo da seção 3.2. A avaliação da ecoeficiência deve resultar em indicadores, que devem ser divulgados para melhoria contínua no ambiente empresarial, na busca pela ecoeficiência dos processos ou produtos.

Assim sendo, o cálculo da ecoeficiência foi realizado a partir da adaptação da Equação 10, conforme a Equação 11:

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor do produto no mercado (R\$)}}{\text{Indicador de impacto da Avaliação da PH}} \quad (11)$$

Para realização da avaliação da ecoeficiência foi necessário determinar o valor do produto e os impactos ambientais. Os impactos ambientais foram determinados por meio da avaliação da Pegada Hídrica, conforme estabelecido na norma ISO 14046:2014. Já o valor do produto foi determinado pelo valor médio (R\$) de venda de um 1 kg de cada produto e coproduto para o mercado consumidor com base nas vendas de 2018, como mostra o Quadro 4 apresenta as unidades de medidas dos indicadores de ecoeficiência calculados a partir da Equação 11, para cada uma das categorias de impacto abordadas nesse estudo.

QUADRO 4 - Unidade de medidas para os indicadores de ecoeficiência.

<b>CATEGORIA DE IMPACTO</b>	<b>UNIDADE</b>
<b>Toxidade humana cancerígena e não cancerígena</b>	$\frac{R\$}{CTUh/UF}$
<b>Ecotoxicidade</b>	$\frac{R\$}{CTUe/UF}$
<b>Eutrofização de água doce</b>	$\frac{R\$}{kg P - eq/UF}$
<b>Escassez hídrica</b>	$\frac{R\$}{m^3/UF}$

Fonte: Elaborado pela autora.

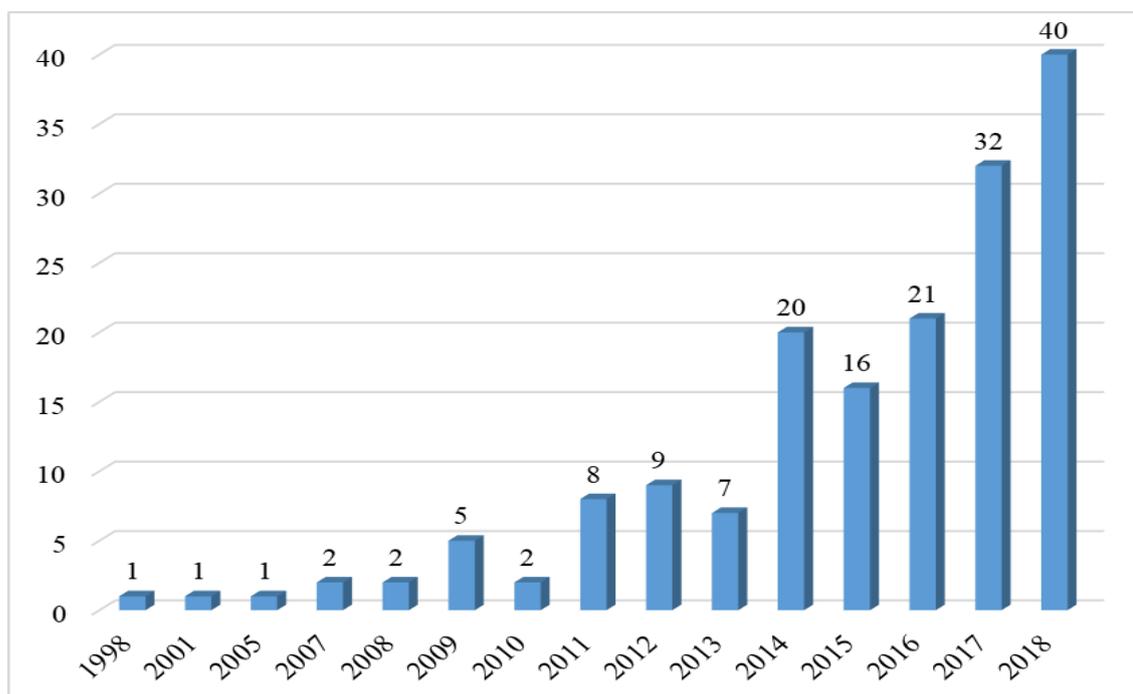
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados e discutidos os resultados desta dissertação da seguinte forma: a seção 4.1 apresenta os resultados da RBS com foco na avaliação da Pegada Hídrica em processos de manufatura; a seção 4.2 apresenta os resultados da análise de inventário para o estudo de caso, enquanto que a seção 4.3 apresenta os resultados da avaliação dos impactos da Pegada Hídrica; a seção 4.4 realiza a interpretação dos resultados da avaliação da Pegada Hídrica conforme os *hotspots* ambientais e as sugestões de melhorias identificadas para o ciclo de vida do produto; por fim, a seção 4.5 realiza a avaliação da ecoeficiência da produção da carne de frango inteiro resfriado no Brasil.

### 4.1 RESULTADOS DA RBS SOBRE A AVALIAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA NA MANUFATURA DE PRODUTOS

Por meio da RBS baseada no protocolo do Anexo B, foi possível constatar o crescimento do tema de pesquisa sobre Pegada Hídrica nos últimos anos, o que ressalta a importância da presente pesquisa. Essa ascensão pode ser observada com o crescimento histórico do número de publicações de documentos publicados nos últimos 21 anos (Figura 15), a partir de 167 documentos identificados até então.

FIGURA 15 - Evolução histórica das publicações sobre Pegada Hídrica de produtos

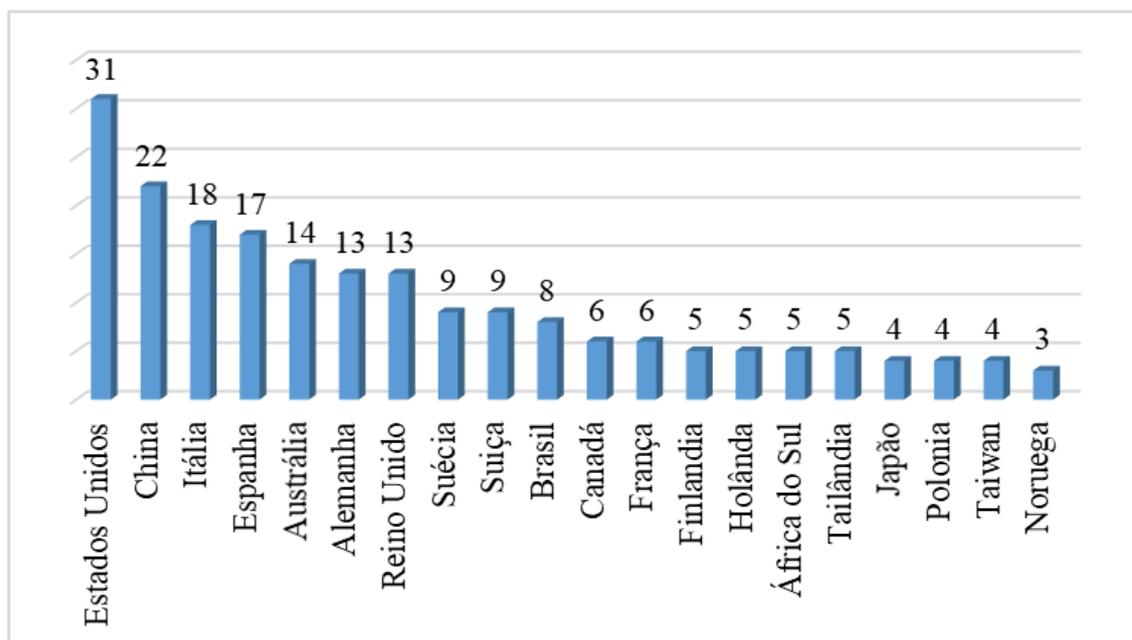


Fonte: Elaborado pela autora.

Nos anos de 1998 e 2013 foram publicados 38 documentos, que representa 23% da amostra. A partir de 2006 foram publicados pelo menos dois documentos em cada ano. A partir do ano de 2014, que foi publicada a normativa ISO 14046, o número de documentos publicados cresceu consideravelmente e houve progressão até o ano de 2018.

Quanto aos países que publicaram estudos sobre a Pegada Hídrica, foram identificados a participação de 45 países, sendo que os principais são apresentados na Figura 16.

FIGURA 16 - Contabilização da participação dos países nos documentos analisados



Fonte: Elaborado pela autora.

Os Estados Unidos foi o país com maior número de publicações, com participação no desenvolvimento de 31 documentos, que representa 13% da amostra. A China, Itália e Espanha participaram em 22, 18 e 17 documentos, respectivamente, que representa entre 9% e 7% da amostra mapeada. Quando analisada a participação do Brasil, o país posicionou-se entre os dez com maior desenvolvimento de estudos sobre Pegada Hídrica, com a colaboração de 08 estudos, que corresponde 3% dos 167 estudos. Os países que participaram de 01 e 02 artigos totalizam 36 países, sendo que 22 participaram em dois estudos e 14 países participaram em 01 estudo apenas. Depois disso foi analisado as instituições desenvolvedoras de estudos sobre avaliação da Pegada Hídrica em sistemas de manufatura (Quadro 5).

QUADRO 5 - Instituições com maior representatividade pelo número de publicações

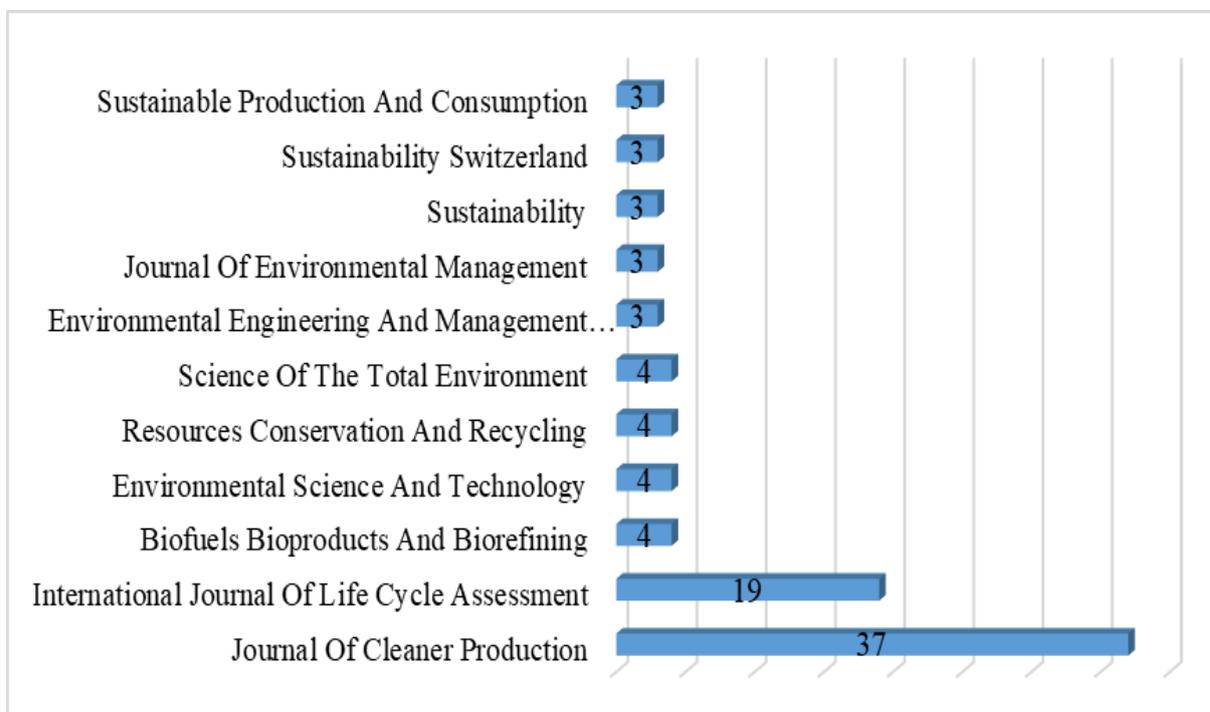
INSTITUIÇÃO/ UNIVERSIDADE	PAÍS	PUBLICAÇÕES
<i>Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation (CSIRO)</i>	Australia	14
<i>Institut de Recerca I Tecnologia Agroalimentaries</i>	Espanha	4
<i>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)</i>	Suíça	4
<i>Chalmers University of Technology</i>	Suécia	4
Universidade de São Paulo – USP	Brasil	4
<i>Universitat Autònoma de Barcelona</i>	Espanha	4
Outros	Demais países	< 4

Fonte: Elaborado pela autora.

Entre as 185 instituições desenvolvedoras das pesquisas, a *CSIRO*, localizada na Austrália, foi condutora de 14 estudos, sendo a instituição com maior representatividade no número de estudos. A instituição “*Institut de Recerca I Tecnologia Agroalimentaries*” (Espanha) e as universidades “*Chalmers University of Technology*” (Suécia), Universidade de São Paulo – USP (Brasil), “*Universitat Autònoma de Barcelona*” (Espanha), e “*ETH Zurich*” (Suíça) vieram na sequência como as maiores desenvolvedoras de estudos sobre a temática.

Também foram identificados um total de 74 periódicos que publicaram sobre o tema de Pegada Hídrica na manufatura de produtos, como apresentado na Figura 17.

FIGURA 17 - Periódicos com maior número de publicações sobre Pegada Hídrica na manufatura



Fonte: Elaborado pela autora.

O “*Journal of Cleaner Production*” foi responsável pela publicação de 37 documentos, o que representa 22% das publicações. O *International Journal of Life Cycle Assessment*, foi o segundo periódico com maior número de publicações, com 19 documentos, ou seja, 11% da amostra. Portanto, esses foram os periódicos mais representativos na divulgação sobre o tema da Pegada Hídrica, como mostra a Figura 17. Os periódicos que publicaram até dois artigos totalizam 80, sendo que 20 periódicos publicaram dois artigos sobre o tema e outros 60 periódicos publicaram um artigo cada.

Na análise de citações, primeiro foram identificados os autores com o maior número de citações dentro do grupo amostral das bases de dados WoS e Scopus (Quadro 6).

QUADRO 6 - Autores mais citados sobre o tema Pegada Hídrica na manufatura de produtos

AUTORES (WOS)	CITAÇÕES	AUTORES (SCOPUS)	CITAÇÕES
Gomiero, T.	171	Orr, S.	368
Paoletti, M. G.		Clift, R.	205
Pimentel, D.		Antón, A.	202
Orr, S.	152	Chapagain, A.	
Ridoutt, B. G.	151	Chenoweth, J.	158
Suh, S.	137	Milà i Canals, L.	
Chapagain, A.	131	Suh, C.	

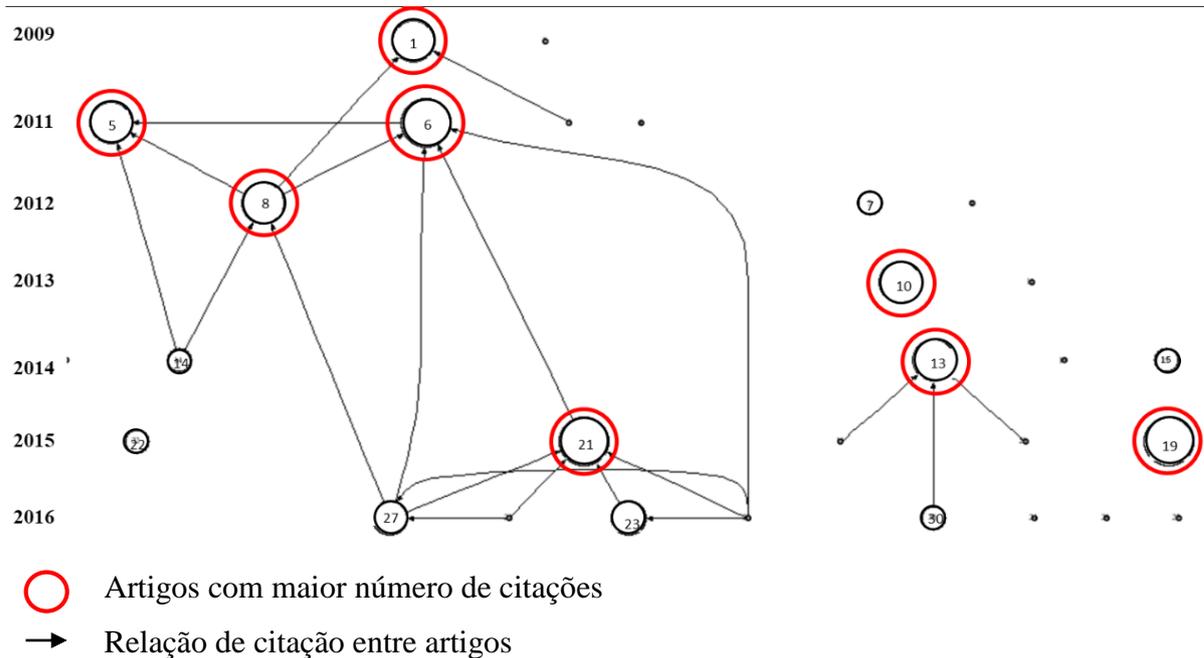
Fonte: Elaborado pela autora.

O pesquisador mais citado foi Stuart Orr, com 368 citações na Scopus e 152 citações na WoS, seguido por Rolando Clift e pelo pesquisador Ashok Chapagain, com 202 citações na Scopus e 131 na WoS (Quadro 6). Stuart Orr desenvolveu diversas pesquisas relacionadas a medição e riscos referentes ao uso da água, com 14 artigos publicados na Scopus, sendo quatro deles em parceria com Ashok Chapagain. Já Ashok Chapagain é membro do grupo de pesquisa *Water Footprint Network* (WFN), um dos principais grupos de estudos sobre Pegada Hídrica no mundo, tendo publicado 25 documentos na Scopus, entre eles um livro e um capítulo de livro, sendo 14 documentos em coautoria com Arjen Hoekstra, criador do termo “*water footprint*”. Clift, R. é um pesquisador renomado nos temas de desenvolvimento sustentável, produção mais limpa e avaliação do ciclo de vida. Sobre a abordagem da ISO 14046:2014, por se tratar de uma metodologia relativamente nova, não foi encontrado nenhum autor de destaque da forma como fora encontrado para a abordagem WFN.

Outra análise realizada foi a de cocitação, utilizada para identificar e compreender a relação entre os pesquisadores do tema estudado. A análise de cocitação é fundamentada na citação de dois autores, sendo associada à semelhança de ideias entre os autores cocitados (GRÁCIO; OLIVEIRA, 2013). O número de vezes que os documentos ou autores são citados em conjunto pode demonstrar que existe uma similaridade de ideias entre eles, essa análise é relevante para identificar o rumo dado aos estudos analisados.

Para identificar os documentos mais relevantes dentro da temática, no estudo de Marques et al. (2018) realizou uma análise primária sobre os artigos com maior número de citações dentro do contexto de Pegada Hídrica na manufatura de produtos. Esses autores focaram sua análise na base WoS e utilizaram como apoio o software HistCite (Figura 18).

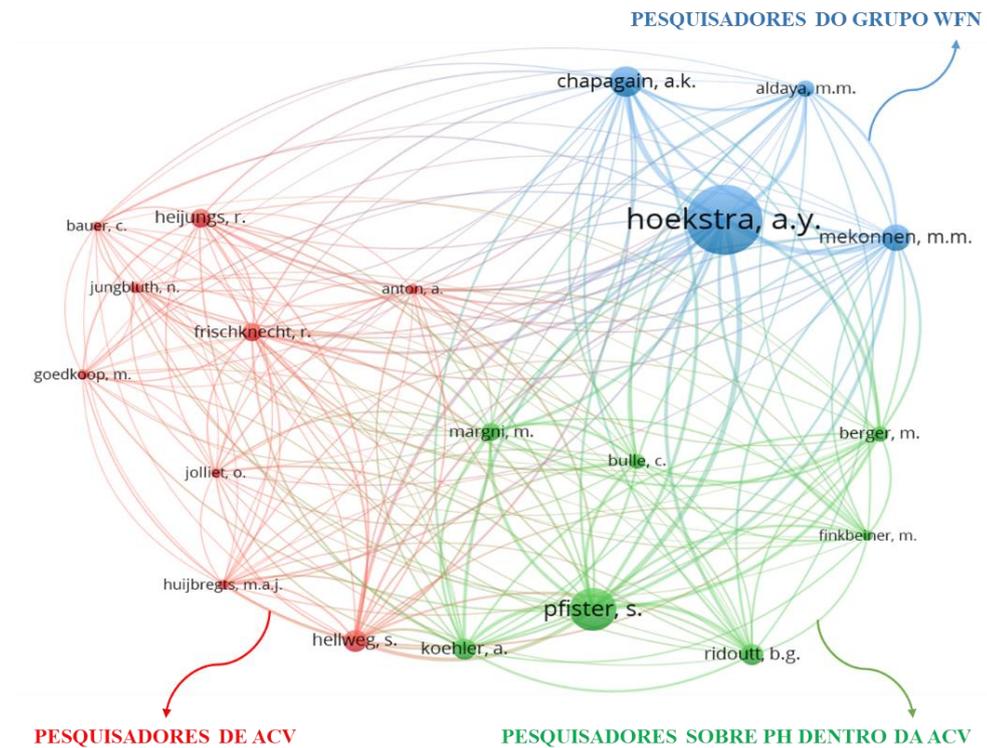
FIGURA 18 - Mapa dos artigos mais citados sobre Pegada Hídrica na manufatura de produtos na base de dados WoS



Fonte: MARQUES et al., 2018.

A Figura 18 mostra quais os documentos sobre Pegada Hídrica mais citados dentro da base de dados WoS. Os círculos em vermelho marcam os artigos com maior número de citações na amostra. As linhas com setas mostram a relação de citação entre eles, os diâmetros dos círculos ao redor dos números mostram a relevância do artigo no grupo amostral e os números referenciam a cada um dos artigos citados na amostra, sendo: (1) Chapagain; Orr (2009); (10) Ridoutt; Pfister (2013); (8) Page et al. (2012); (6) Ridoutt et al. (2011); (19) Gu et al. (2015) e (21) Bonamente et al. (2015). Depois disso, na Figura 19 foi feita uma nova análise dos autores mais cocitados dentro da amostra de documentos, agora segundo a base de dados Scopus, de forma a complementar os resultados da Figura 18 focados apenas na base WoS.

FIGURA 19 - Mapa de cocitação da Pegada Hídrica na manufatura pela base de dados Scopus



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram identificados mais de 9500 autores cocitados, e selecionaram-se os autores com mais de 35 citações, o que resultou em 20 autores. No mapa de cocitações (Figura 19), foi possível identificar três “clusters” (azul, vermelho e verde) de pesquisas e vinte pesquisadores. Quanto maior o diâmetro dos círculos sobre os nomes dos pesquisadores, maior a relevância desse dentro do mapa. O pesquisador Arjen Hoekstra possui conexão com quase todos os outros autores presentes na rede, o que mostra sua relevância no contexto da Pegada Hídrica. A influência de Hoekstra nos estudos sobre Pegada Hídrica pode ser justificada pela criação do termo “*water footprint*”, e a partir dele surgiram novos estudos sobre o tema. O pesquisador Stephan Pfister também foi representativo nessa análise, esse autor desenvolve principalmente estudos sobre escassez hídrica e sobre a aplicação da Pegada Hídrica ao longo do ciclo de vida de diversos produtos e processos.

Além de identificar os documentos mais citados, buscou-se identificar também o objetivo dos estudos realizados até então, também foram mapeadas as categorias de impacto relacionadas a água que tem sido estudada e os setores produtivos de aplicação dos estudos de Pegada Hídrica (Quadro 7).

QUADRO 7 - Documentos mais citados dentro da temática Pegada Hídrica dentro da amostra da base de dados Scopus

<b>DOCUMENTOS</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>CATEGORIA DE IMPACTO RELACIONADA A PEGADA HÍDRICA</b>	<b>SETOR DE APLICAÇÃO</b>
Milà i Canals et al. (2009)	Criar indicador de avaliação de impacto na escassez hídrica	Impacto do ecossistema de água doce; Depleção de água doce	
Gomiero et al. (2011)	Revisar literatura	Uso da água	Sistema agrícola convencional e orgânico de diferentes culturas
Hertwich et al. (2014)	Revisar literatura	Ecotoxicidade de água doce; Eutrofização de água doce	Fontes energéticas (hidrelétrica; solar; geotérmica; fóssil)
Chapagain; Orr (2009)	Estudar caso	Uso da água	Produção de tomates
Page et al. (2012)	Estudar caso	Escassez de água doce	Produção de tomates
Ridoutt; Pfister (2013)	Melhorar modelo de avaliação de escassez hídrica	Escassez de água doce	
Klimes (2012)	Revisar literatura	Escassez de água doce	
Socolof et al. (2005)	Estudar caso	Eutrofização de água doce, Ecotoxicidade de água doce, Qualidade da água pela Demanda biológica de oxigênio (DBO) e pelo Total de Sólidos Suspensos (TSS)	Produção de monitores de tubo e LCD
Pfister et al. (2011)	Criar método de avaliação de impacto na escassez hídrica	Escassez de água doce	Produção de amendoins com chocolate e molho de tomate
Northey et al. (2013)	Revisar literatura	Escassez de água doce	Mineração de cobre
Calderón et al. (2010)	Estudar caso	Ecotoxicidade da água doce	Refeições prontas
Manfredi; Vignali (2014)	Estudar caso	Ecotoxicidade de água doce; Eutrofização de água doce	Fontes energéticas renováveis e não renováveis
Arsenault et al. (2009)	Estudar caso	Ecotoxicidade da água doce	Produção de leite
Manzardo et al. (2014)	Estudar caso	Escassez de água doce + Análise de Decisão Multicritério (ADMC)	Produção de papel e celulose

Fonte: Elaborado pela autora.

Nesta etapa, foi possível identificar que a categoria de impacto mais tratada nos estudos se referem a escassez hídrica, seguidos por eutrofização e ecotoxicidade de água doce. Tais resultados foram relevantes para esta pesquisa, durante a etapa de seleção de categorias de impacto para o atingimento do objetivo da pesquisa.

Quanto ao setor de aplicação dos estudos, foi possível identificar na amostra de 167 documentos que a maior parte dos estudos não focam unicamente no setor de manufatura de produtos. Alguns dos mais citados analisaram também aplicação da Pegada Hídrica no setor agrícola como na produção de tomate, produção de leite e até mesmo sobre as fontes energéticas renováveis (biomassa). Especificamente sobre a Pegada Hídrica em processos de manufatura, ao todo foram identificados 27 documentos (Quadro 8).

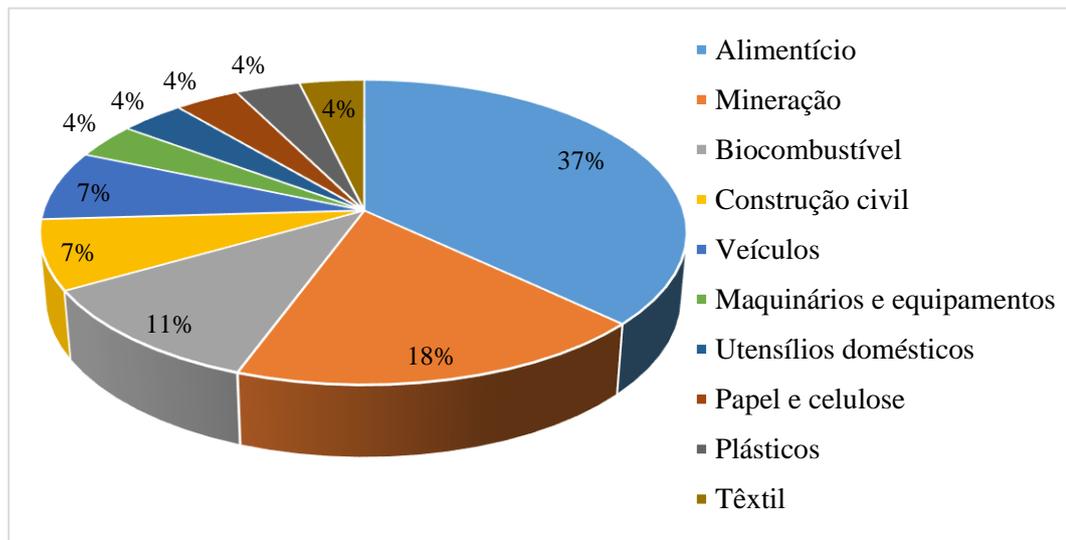
QUADRO 8 - Produtos analisados dentro do contexto de Pegada Hídrica na manufatura de produtos

<b>PRODUTO/PROCESSO</b>	<b>DOCUMENTOS</b>
Chip semicondutor	Frost; Hua (2017)
Plásticos	Cheroennet et al. (2018)
Biorrefinaria	Pan et al. (2016)
Carne suína e embutidos	Noya et al. (2016)
Óleo de palma	Subramaniam; Hashim (2018)
	Silalertruksa; Gheewala; Pongpat (2017)
Alumínio	Nunez; Jones (2016)
Papel	Ma et al. (2018a)
Aço	Ma et al. (2018b)
Polpa de tomate	Manfredi; Vignali (2014)
Fibra têxtil	Sandin; peters; svanström (2013)
Máquina	Chen; Chen; Huang (2015)
Gás xisto	Tagliaferri et al. (2017)
Cobre, Zinco e Níquel	Northey et al. (2017)
Cerâmica	Kandananond (2018)
Carros	Berger et al. (2012)
	Semmens; Bras; Guldberg (2014)
Laticínios	Vasilaki et al. (2016)
	Bai et al. (2018)
	Huang et al. (2014)
Materiais de construção – Telha	Octavia; Laurence; Hartono (2018)
Materiais de construção – Cimento	Hosseinian; Nezamoleslami (2016)
Vinho	Bonamente et al. (2016)
	Herath et al. (2013)
	Bonamente et al. (2015)
	Rinaldi et al. (2016)
Chips de batata, manga, vinho	Ridoutt et al. (2016)

Fonte: Elaborado pela autora.

A produção de vinhos foi tratada em cinco artigos, outros três documentos focaram na cadeia produtiva de leite e derivados. Constatou-se que o setor alimentício foi abordado na maior parte dos estudos, seguido pelo setor de mineração. A Figura 20 apresenta os setores da manufatura que os estudos de Pegada Hídrica foram aplicados.

FIGURA 20 – Setores da manufatura que os estudos de Pegada Hídrica foram aplicados.



Fonte: Elaborado pela autora.

No setor de alimentos (vinho, laticínios, embutidos, chips de batata e polpa de tomate), foram mapeados 10 estudos (37% da amostra). Cinco documentos abordaram a Pegada Hídrica no setor de mineração e produção de metais (aço, alumínio, cobre, zinco e níquel, representando 18% da amostra). Por fim, o setor de biocombustíveis representou 11% das pesquisas, com destaque para a produção de óleo de palma e de biocombustível gerado pela hidrólise de palha de milho.

Os processos produtivos ligados a cadeia produtiva de alimentos e biocombustíveis são consumidores de grandes volumes de água. Já os estudos voltados para os processos de mineração pode ser justificado pela localização das minas, que muitas das vezes estão localizadas em regiões de limitação de recursos hídricos, sendo fundamental o desenvolvimento de pesquisas que busquem reduzir o consumo de água nesse setor (NORTHEY et al., 2017).

Por fim, vale ressaltar que não foram encontrados artigos com foco no processamento industrial da carne de frango. Assim os resultados dessa dissertação que serão apresentados ao longo da seção 4.2, poderão contribuir diretamente para esta lacuna de pesquisa.

Dentre os documentos que realizaram a Pegada Hídrica em processos de fabricação a partir do Quadro 8, foi feita a separação da abordagem metodológica adotada em cada um dos estudos encontrados. Essa etapa foi fundamental para conhecer quais são as principais abordagens utilizadas, o que é fundamental para nortear os novos estudos do gênero.

Dos documentos selecionados, a abordagem da ISO 14046:2014 foi adotada como única, em 06 estudos, a abordagem do WFN foi adotada com única em 09 trabalhos e outros 05 documentos utilizaram as duas abordagens em conjunto. O maior número de estudos utilizando o indicador de avaliação da Pegada Hídrica proposto pelo WFN pode ser justificado por ser o estudo pioneiro para avaliação da Pegada Hídrica. Entretanto, sua utilização tem cedido espaço cada vez mais para a aplicação de outras ferramentas, como a avaliação da Pegada Hídrica baseada na série ISO 14046:2014 (MARQUES et al., 2018). Por fim, os resultados encontrados nesta RBS apontaram para:

- Necessidade de realizar mais estudos de avaliação da Pegada Hídrica no contexto brasileiro, visto que o país ainda é incipiente nesta temática comparativamente a outros países. Além disso, o Brasil também não se mostrou em destaque entre os autores mais citados e cocitados na amostra mapeada;
- Necessidade de desenvolver mais estudos de Avaliação da Pegada Hídrica em processos de manufatura, visto que a maior parte dos trabalhos ainda ocorre apenas no setor agropecuário;
- Necessidade de realizar mais estudos com foco na abordagem metodológica da ISO 14046:2014, pois a maior parte dos estudos de Pegada Hídrica ainda se limitam a abordagem WFN;
- Necessidade de avaliar mais categorias de impacto além da PEH, que é mais adotada em estudos de Pegada Hídrica. Assim, mais estudos incluindo categorias de impacto como toxicidade humana, ecotoxicidade e eutrofização são desejáveis;
- Necessidade de realizar estudos mais amplos, por exemplo, incluindo a avaliação da ecoeficiência com intuito de gerar mais valor ao menor impacto potencial no ciclo de vida dos produtos. Tal abordagem não foi encontrada nos estudos mapeados até o momento, nem mesmo nas revistas mais prolíficas da área, como o *Journal of Cleaner Production* e o *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

Assim, esta dissertação de mestrado a partir dos resultados da RBS apresenta a seguir os resultados do estudo de caso da avaliação da Pegada Hídrica e da avaliação da ecoeficiência da produção de frango inteiro resfriado para o contexto nacional. Tal contribuição visa, entre outras motivações, sanar parte das necessidades de pesquisa supracitadas.

#### 4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO DE PEGADA HÍDRICA

A seguir são apresentadas as tabelas com os inventários. A Tabela 3 mostra os dados do processo de descanso das aves; a Tabela 4 apresenta os dados referentes ao recebimento das aves no abatedouro, a Tabela 5 contém os dados do processo de insensibilização e sangria, a Tabela 6 mostra os dados da escaldagem do frango, a Tabela 7 apresenta os dados sobre o processo de depenagem, a Tabela 8 mostra os dados do processo de evisceração, e a Tabela 9 apresenta os dados do processo de resfriamento do frango inteiro resfriado. Por fim, são apresentadas as tabelas com os inventários dos processos de apoio à manufatura, sendo apresentados na Tabela 10 os dados da Estação de Tratamento de Água (ETA), na Tabela 11 os dados para produção de vapor, na Tabela 12 estão contidos os dados da produção de água pressurizada, e a Tabela 13 apresenta os dados referentes à Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

TABELA 3 - Inventário do processo de descanso das aves

<b>INDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Descanso de aves</b>			
<b>LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa</b>			
<b>MÊS DE INÍCIO: 01/2018</b>		<b>MÊS DE FIM: 12/2018</b>	
<b>UNIDADE FUNCIONAL (UF):1 kg de frango inteiro resfriado</b>			
<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unid.</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	10192	0,014	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango vivo	909.761	1,250	kg
Água de higienização	430.722	0,592	kg
Água de processo	169.000	0,232	kg
<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>			
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unid.</b>
Frango vivo	909.761	1,250	Kg
<b>EMISSIONES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	599.722	0,824	Kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 4 - Inventário do processo de recepção das aves

<b>IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Recepção de aves</b>			
<b>LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa</b>			
<b>MÊS DE INÍCIO: 01/2018</b>		<b>MÊS DE FIM: 12/2018</b>	
<b>UNIDADE FUNCIONAL (UF):1 kg de frango inteiro resfriado</b>			
<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	39227	0,054	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango vivo	909.761	1,250	kg
Água de higienização	598.342	0,822	kg
Água de processo	22.000	0,030	kg
<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango vivo	908.389	1,248	kg
<b>EMISSIONES PARA O SOLO</b>			
Frango morto (animais sacrificados e/ou não sobreviventes durante o processo)	1.372	0,002	kg
<b>EMISSIONES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	620.342	0,852	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 5 - Inventário do processo de insensibilização e sangria

<b>IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Insensibilização e sangria</b>			
<b>LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa</b>			
<b>MÊS DE INÍCIO: 01/2018</b>		<b>MÊS DE FIM: 12/2018</b>	
<b>UNIDADE FUNCIONAL (UF):1 kg de frango inteiro resfriado</b>			
<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	11892	0,016	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango vivo	908.389	1,248	kg
Água de higienização	154.913	0,213	
Água de processo	33.000	0,045	kg
<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango abatido	885.679	1,217	kg
<b>SAÍDA SUBPRODUTO</b>			
Sangue	22.710	0,031	kg
<b>EMISSIONES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	187.913	0,258	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 6 - Inventário do processo de escaldagem de frango

<b>IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Escaldagem</b>			
<b>LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa</b>			
<b>MÊS DE INÍCIO: 01/2018</b>		<b>MÊS DE FIM: 12/2018</b>	
<b>UNIDADE FUNCIONAL (UF):1 kg de frango inteiro resfriado</b>			

<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	19027	0,026	kWh
Vapor	132.000	0,181	kg
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango abatido	885.679	1,217	kg
Água de higienização	72.352	0,099	kg
Água de processo	176.000	0,242	kg

<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango abatido	885.679	1,217	kg
<b>EMISSÕES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	248.352	0,341	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 7 - Inventário do processo de depenagem de frango

<b>IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Depenagem</b>			
<b>LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa</b>			
<b>MÊS DE INÍCIO: 01/2018</b>		<b>MÊS DE FIM: 12/2018</b>	
<b>UNIDADE FUNCIONAL (UF):1 kg de frango inteiro resfriado</b>			

<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	28540	0,039	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango abatido	885.679	1,217	kg
Água de higienização	133.973	133,973	kg
Água de processo	769.000	1,057	kg

<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unid.</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango abatido	794.840	1,092	kg
Pés de frango	31.794	0,044	kg
<b>SAÍDA SUBPRODUTO</b>			
Penas	59.045	0,081	kg
<b>EMISSÕES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	902.973	1,241	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 8 - Inventário do processo de evisceração de frango

**IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Evisceração**  
**LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa**  
**MÊS DE INÍCIO: 01/2018** **MÊS DE FIM: 12/2018**  
**UNIDADE FUNCIONAL (UF): 1 kg de frango inteiro resfriado**

<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	84188	0,116	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango abatido	794.840	1,092	kg
Água de higienização	549.985	0,760	kg
Água de processo	1.100.000	1,510	kg
<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango inteiro	686.197	0,940	kg
Miúdos	27.797	0,038	kg
<b>SAÍDA SUBPRODUTO</b>			
Vísceras e partes condenadas	80.847	0,111	kg
<b>EMISSÕES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	1.649.985	2,600	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 9 - Inventário do processo de resfriamento de frango

**IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO: Resfriamento**  
**LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS: Própria empresa**  
**MÊS DE INÍCIO: 01/2018** **MÊS DE FIM: 12/2018**  
**UNIDADE FUNCIONAL (UF): 1 kg de frango inteiro resfriado**

<b>FLUXO DE ENTRADAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>			
Energia	101165	0,139	kWh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>			
Frango inteiro	686.197	0,942	kg
Água de higienização	421.713	0,580	kg
Água de processo	1.300.481	1,755	kg
<b>FLUXO DE SAÍDAS</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>			
Frango inteiro	727.808	1,000	kg
<b>EMISSÕES PARA ÁGUA</b>			
Efluente bruto	1.680.583	3,414	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 10 - Inventário da Estação de Tratamento de Água (ETA)

<b>Identificação do processo: Estação de Tratamento de Água (ETA)</b>			
<b>Local de origem dos dados: própria empresa</b>			
<b>Mês de início: 01/2018</b>		<b>Mês de fim: 01/2019</b>	
<b>Unidade funcional (UF): 1 kg de água tratada</b>			
<b>Fluxo de entradas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>Consumo de materiais</b>			
Água bruta	9.000.000	1,058	kg
Sulfato de alumínio	450	5,29e-05	kg
Polímero aniônico	5	5,88e-07	kg
Cloro	150	1,76e-05	kg
Energia	3.660	4,31e-04	kWh
<b>Fluxo de saídas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>Saída principal</b>			
Água tratada	8.500.150	1	kg
Água de retorno	500.455	0,059	kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 11 - Inventário do processo da produção de vapor

<b>Identificação do processo: Gerador de vapor</b>			
<b>Local de origem dos dados: própria empresa</b>			
<b>Mês de início: 01/2018</b>		<b>Mês de fim: 01/2019</b>	
<b>Unidade funcional (UF): 1 kg de vapor</b>			
<b>Fluxo de entradas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>Consumo de materiais</b>			
Água tratada		0,020	Kg
Lenha de eucalipto		0,313	kg
Vapor condensado		0,667	kg
Energia		0,042	kWh
<b>Fluxo de saídas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>Saída principal</b>			
Vapor		1	Kg
Cinzas		0,00007	Kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 12 - Inventário do processo de água pressurizada para higienização

**Identificação do processo: Água pressurizada para higienização**  
**Local de origem dos dados: própria empresa**  
**Mês de início: 01/2018**                      **Mês de fim: 01/2019**  
**Unidade funcional (UF): 1 kg de água pressurizada**

<b>Fluxo de entradas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
<b>Consumo de materiais</b>			
Água bruta		1	Kg
Energia		0,002	kWh
<b>Fluxo de saídas</b>			
<b>Saída principal</b>			
Água pressurizada		1	Kg

Fonte: Elaborado pela autora.

TABELA 13 - Inventário da Estação de Tratamento de Efluente (ETE)

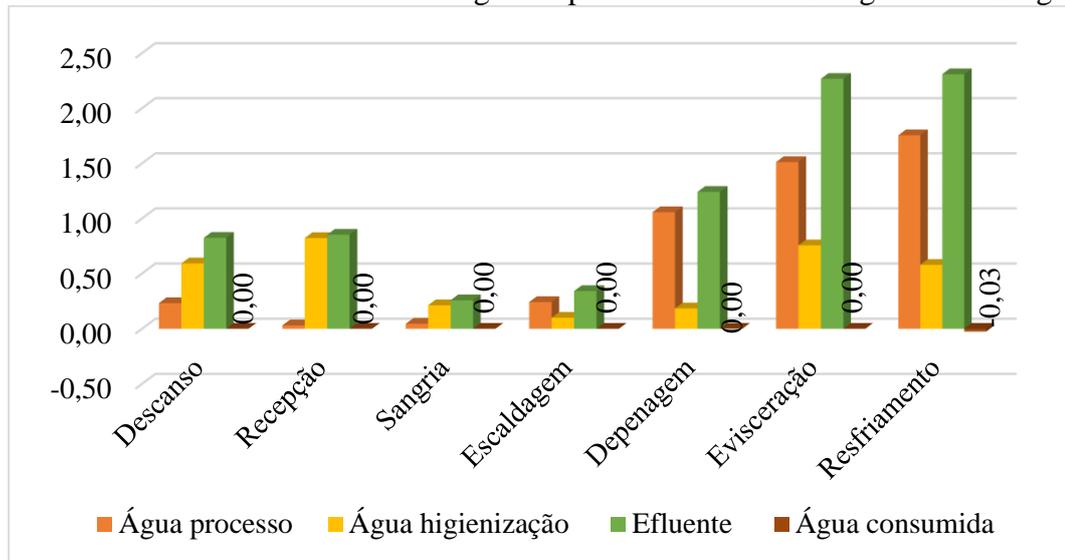
**Identificação do processo: Estação de Tratamento de Efluente (ETE)**  
**Local de origem dos dados: própria empresa**  
**Mês de início: 01/2018**                      **Mês de fim: 01/2019**  
**Unidade funcional (UF): 1 kg de efluente tratado**

<b>Fluxo de entradas</b>	<b>Dado bruto</b>	<b>Dado para UF</b>	<b>Unidade</b>
Efluente bruto	7.272.000	1,0032	Kg
Polímero aniônico	14	0,0000	Kg
Sulfato	2340	0,0003	Kg
Água	13.500	0,0019	Kg
<b>Fluxo de saídas</b>			
Efluente tratado	7.248.665	1,0000	Kg
Lodo	22.000,00	0,0030	Kg
Óleo	9.800,00	0,0014	Kg
Demanda Biológica de Oxigênio (DBO)	5,55E+02	0,0001	Kg
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	1,78E+03	0,0002	Kg
Sólidos totais	4,64E+03	0,0006	Kg
Nitrogênio total	4,00E+02	0,0001	Kg
Fósforo	7,25E+00	0,0000010	Kg

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 21 mostra os dados referentes ao uso da água e a geração de efluentes nos processos elementares, sendo considerada a água utilizada durante o processamento do frango inteiro resfriado e a água necessária para a higienização dos equipamentos e estrutura física da fábrica. A água para higienização foi contabilizada e inserida na modelagem por ser utilizada em grande quantidade e por ser fundamental para a realização da atividade de manufatura por quesitos higiênicos, sanitários e legais.

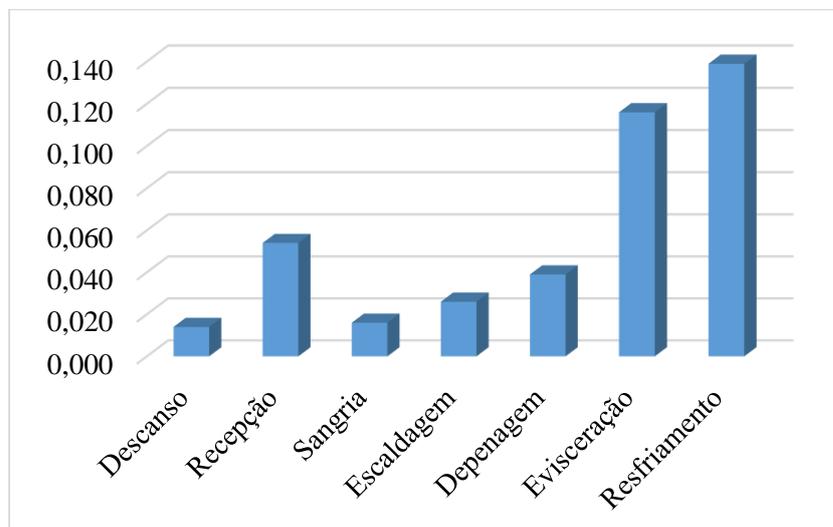
FIGURA 21 – Uso e consumo de água no processamento do frango inteiro L/kg.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os processos que mais utilizam água são a depenagem, a evisceração e o resfriamento. Pelos dados de inventário, é possível concluir que somente no processo de resfriamento ocorre a incorporação de água ao produto, cerca de 0,03 L/kg de frango inteiro resfriado. Nos demais processos da manufatura, toda a água utilizada retorna para o mesmo manancial de captação, após o tratamento dos efluentes. O processo de geração de vapor também impacta na escassez hídrica, uma vez que cerca de 30% do vapor produzido não retorna (condensado) para o sistema de geração de vapor, sendo necessária a inserção de água tratada para reabastecer o sistema, que trabalha de forma contínua. Outro insumo essencial para a produção do frango inteiro é a eletricidade, a Figura 22 mostra o consumo de energia por quilograma de produto.

FIGURA 22 - Consumo de energia para produção para 1 kg de frango inteiro resfriado (kWh/kg)



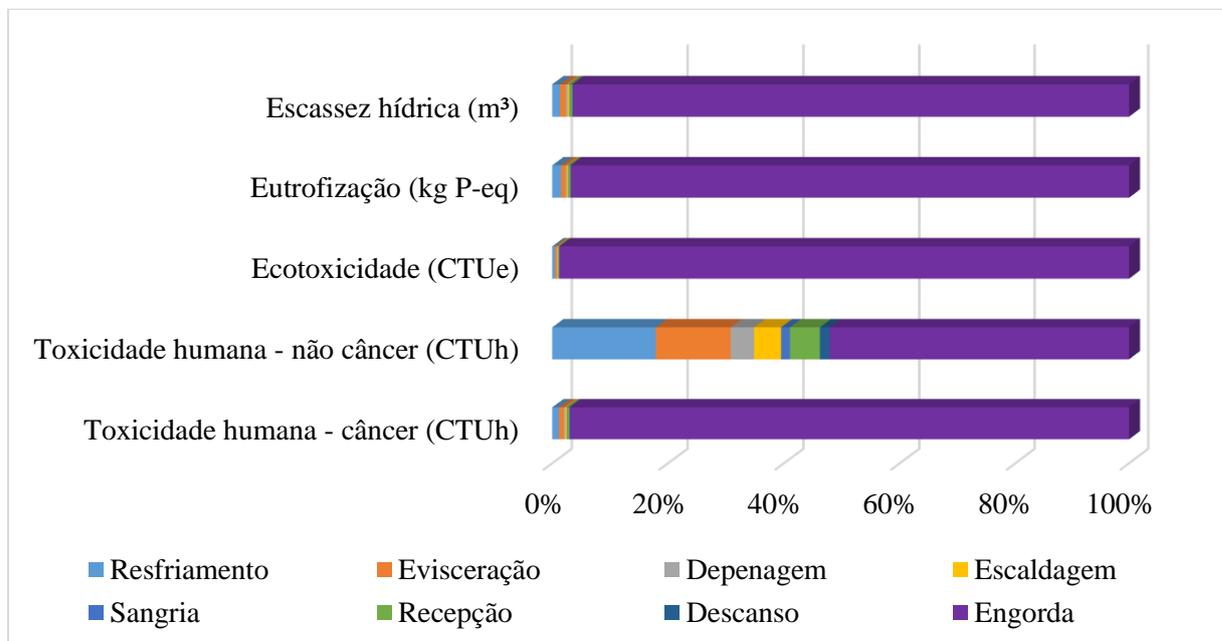
Fonte: Elaborado pela autora.

O processo elementar que mais utiliza eletricidade é o resfriamento do frango inteiro, que corresponde a 34% da energia utilizada no sistema, seguido dos processos de evisceração (29%), recepção de aves (13%) e depenagem (10%).

#### 4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DA PEGADA HÍDRICA

Inicialmente foi feita a avaliação de impactos da Pegada Hídrica da situação de referência (cenário atual) para produção de 1kg de frango inteiro resfriado, como detalhado na seção 3.2.4.1. O resultado dos impactos da Pegada Hídrica para o sistema de referência pode ser encontrado no Anexo E. Para melhor compreensão desses resultados, foi feita a análise de contribuição da Pegada Hídrica do sistema de produto, como mostra a Figura 23.

FIGURA 23 - Contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (situação de referência).



Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio das Figura 23 é possível observar que o processo de engorda das aves é mais impactante para todas as categorias de impacto estudada. O impacto de ecotoxicidade concentrou-se na etapa de engorda das aves. As produções de soja e de milho, destinadas à alimentação das aves, representaram 46% desse impacto (28% do milho e 18% da soja). Entretanto não foi possível comparar os dados, uma vez que não foi identificado na literatura estudos que tivessem avaliado o impacto de ecotoxicidade da cadeia produtiva de frangos.

Para a escassez hídrica, a principal fonte desse impacto foi a irrigação de grãos incorporados na ração, utilizada durante a etapa de engorda do frango. Esse resultado pode ser

confirmado com os resultados apresentados nos estudos de Mekonnen et al. (2019), Ocak et al. (2013). Diante disso, pode-se afirmar que os resultados desse estudo de avaliação da Pegada Hídrica do processamento da carne de frango obtiveram resultados semelhantes aos relatados na literatura. Porém, vale ressaltar que os estudos publicados estavam focados na análise da Pegada Hídrica volumétrica, quando nesse estudo avaliou-se o impacto do consumo de água.

No estudo de Wiedemann (2017) foi feita a avaliação do uso de água pelo indicador de estresse hídrico estabelecido por Pfister et al. (2009), conforme estabelecido pela ISO 14046:2014 para toda a cadeia produtiva de dois tipos de frango criados em sistema convencional e ao ar livre. Essa avaliação resultou num consumo de água doce entre 38 e 111 L/kg para produção convencional e num consumo de 70 L/kg para criação ao ar livre, sendo que o consumo de água associada à produção de alimentos (irrigação de grãos) para animais foi o maior contribuinte para os impactos da escassez. Portanto, o presente estudo e o estudo de Wiedemann (2017) identificaram que a irrigação de grãos foi o principal *hotspot* responsável pelo impacto de escassez hídrica. Dessa forma é fundamental estudos que otimizem o sistema de irrigação durante a produção de grãos e outros alimentos, visando minimizar tal impacto potencial.

A engorda das aves também foi o processo mais impactante na categoria de eutrofização. A produção de ração foi o principal fluxo gerador desse impacto, sendo a produção de soja o principal *hotspots*. Nos estudos de ACV da produção de carne frango de Da Silva et al. (2014) e de Cesari et al. (2017), foi avaliada a categoria de eutrofização pelo método CML 2001, sendo encontrados resultados de 14 kg P-Eq/UF e 18,4 kg P-Eq/UF, respectivamente. O estudo de Da Silva et al. (2014) abrangeu seu sistema de produto até a distribuição de 1tonelada de carne resfriada e o estudo de Cesari et al. (2017) avaliou a produção de 1kg de carcaça na saída do abatedouro. Logo, os sistemas não são equivalentes e nem diretamente comparáveis ao desta dissertação, visto que as delimitações dos respectivos sistemas de produto foram distintas.

Para toxicidade humana cancerígena, o processo de engorda das aves foi responsável por 97% desse impacto, sendo a produção de milho o fluxo com maior potencial de impacto. Já para categoria de toxicidade humana não cancerígena o fluxo com maior potencial de impacto foi a produção de eletricidade, que representou mais de 60% dos impactos gerados. Não foram identificados estudos sobre a produção de carne de frango considerando as categorias de impacto de toxicidade humana cancerígena e não cancerígena pelo método ReCiPe. O estudo de Payandeh et al. (2017) avaliou a categoria de toxicidade humana por meio do *CML-IA baseline V3.02/EU25/Characterization* e obteve o resultado de 41447.050 kg 1,4-DB eq. Vale ressaltar

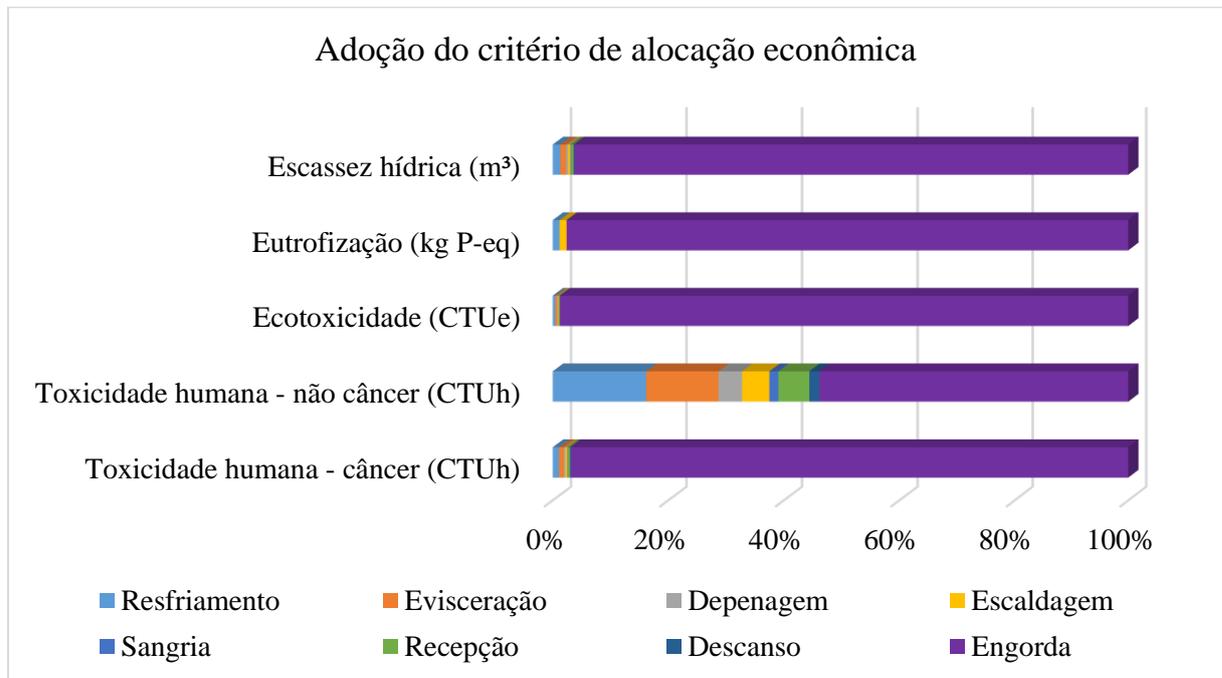
que o estudo de Payandeh et al. (2017) não é direcionado pela norma ISO 14046:2014, portanto, não focou nos impactos associados ao uso da água doce.

### 4.3.1 Análise de sensibilidade

#### 4.3.1.1 Adoção do critério de alocação econômica

Depois de identificado o processo hotspots do sistema estudado, foi realizada a análise de sensibilidade adotando o critério de alocação econômica para verificar se acontecem mudanças significativas nos percentuais de impactos e se ocorre alterações no processo *hotspots*, como apresenta a Figura 24. Os valores para adoção do critério de alocação econômica estão presentes no Anexo F.

FIGURA 24 - Contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (alocação econômica).



Por meio da Figura 24 foi possível visualizar que as avaliações para os dois critérios de alocação tiveram resultados semelhantes quanto aos percentuais de impactos para todas as categorias analisadas, sendo a engorda das aves mais impactante para todas as categorias de impacto quando comparada à atividade de manufatura.

O impacto de ecotoxicidade concentrou-se na etapa de engorda das aves (99% para os impactos pela alocação física e 90%, na econômica). Para a escassez hídrica, a principal fonte desse impacto (96% para alocação física e 86%, para econômica). A engorda das aves também foi o processo mais impactante na categoria de eutrofização, representando cerca de 97% para o

cenário de alocação física e 92% para o cenário de alocação econômica. Para toxicidade humana cancerígena, o processo de engorda das aves foi responsável por 97% desse impacto na alocação física e 90% de impacto na alocação econômica. Para toxicidade humana cancerígena não cancerígena os percentuais foram de 52% para alocação física e 54% para alocação econômica.

No sistema de engorda das aves o principal fluxo gerador de impactos esteve associado à produção de rações para engorda das aves, sendo a produção de milho e soja os insumos responsáveis pelos maiores percentuais de impactos para as categorias de ecotoxicidade, toxicidade humana cancerígena, escassez hídrica e eutrofização de água doce. Para todos os processos elementares da manufatura, a produção de energia foi o principal fluxo gerador de impactos, ou seja, o *hotspots* ambiental dentro do sistema fabril analisado. Sendo assim, medidas que busquem reduzir o consumo de energia são fundamentais para redução dos impactos hídricos gerados na produção da carne do frango inteiro resfriado.

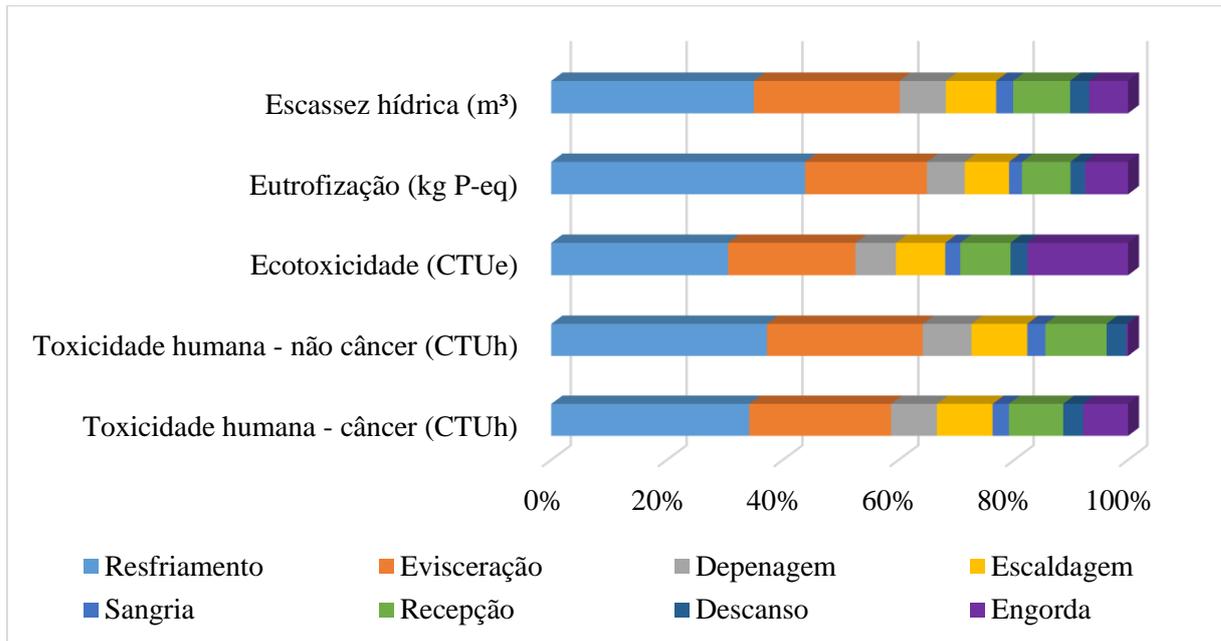
#### *4.3.1.2 Adoção do tempo de processamento aos processos elementares do sistema de referência*

Sabendo que o tempo necessário para o crescimento e engorda (42 dias, ou seja, 1008 horas) das aves é diferente do tempo de processamento do frango inteiro resfriado na indústria (2,8 horas), realizou-se a divisão dos resultados de impactos (Anexo E) pelo tempo de engorda das aves e ao tempo utilizado nos processos de manufatura (Figura 25).

A associação do tempo a UF deve-se a importância que o tempo tem nos sistemas de manufatura, uma vez que é o principal indicador de produtividade e eficácia nesses sistemas. Outro quesito fundamental é que o tempo necessário para produção de 1kg de frango no processo engorda da ave (atividade agrícola) é relevantemente superior ao tempo para processar 1kg de frango na atividade de manufatura.

Nesse caso, a unidade funcional foi adaptada de 1kg de frango inteiro resfriado para 1 h de produção do frango inteiro resfriado, ou seja, os impactos foram comparados em termos do tempo de produção, sendo os resultados apresentados no Anexo G. A Figura 25 apresenta o percentual de contribuição da Pegada Hídrica de cada um dos processos elementares.

FIGURA 25 - Percentual de impactos associados a uma hora de processamento



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao associar os resultados dos impactos hídricos ao tempo de processamento, a atividade de manufatura passou a ser mais impactante em todas as categorias de impacto analisadas (Figura 25). Assim, pode-se concluir a importância do desenvolvimento de estudos da Pegada Hídrica e de outros impactos ambientais gerados nos sistemas de manufatura incluindo o tempo de fabricação como unidade funcional e não somente a quantidade (volume ou massa) produzida. Isso ocorre, pois, a atividade de manufatura produz grandes volumes de mercadorias em curto período se comparado a produção de grãos e ao processo engorda de animais, que é mais lento e assim, menos impactante sob essa nova óptica proposta na Figura 25.

Vale ressaltar que em processos de manufatura do tipo produção em massa, onde a quantidade de produtos é consideravelmente alta e os tempos de fabricação são curtos, estudos envolvendo a ACV ou a avaliação da Pegada Hídrica poderiam realizar a análise dos processos de fabricação com a perceptiva do tempo de processamento na unidade funcional, para se evitar subestimar os impactos desta etapa do ciclo de vida dos produtos. Afinal, como os tempos de fabricação são mais curtos (se comparados aos processos agropecuários), os impactos de curto prazo, por unidade de tempo, tendem a ser maiores.

Por meio da Figura 25, pode-se concluir que o resfriamento representou em média 36% dos impactos para todas as categorias escolhidas, seguido da evisceração com 24% e recepção de aves com 10%. Os demais processos tiveram média de impactos inferiores a 10% nas

categorias estudadas, sendo: depenagem (8%), escaldagem (9%), sangria (3%), descanso de aves (3%) e engorda (8%). Dessa forma, o sistema de manufatura resultou em 98% de contribuição nos impactos quando esse foi associado ao tempo de processamento e não a massa de carne de frango produzida.

#### 4.3.1.3. Alterando o valor da UF para receita anual – alocação evitada via expansão do sistema

A norma ISO 14044:2009 estabelece meios para se evitar a adoção do emprego de critérios de alocação sempre que possível. Assim, uma medida tomada para se evitar o uso de alocação nesse estudo foi a mudança da unidade funcional adotada. De acordo com os dados da empresa estudada, a média da receita anual dos produtos e coprodutos obtidos durante o processamento do frango inteiro resfriado, no ano de 2018, foi de R\$336.935.129,59, como mostra a Tabela 14.

TABELA 14 - Receita do ano de 2018 obtida na produção do frango inteiro resfriado

<i>Produto</i>	<i>Receita anual</i>
Frango inteiro resfriado	R\$ 250.402.784,38
Miúdos	R\$ 30.146.120,09
Pés	R\$ 49.198.916,34
Penas	R\$ 2.350.237,92
Sangue	R\$ 903.937,66
Vísceras	R\$ 3.933.133,20
<b>Total receita anual</b>	<b>R\$ 336.935.129,59</b>

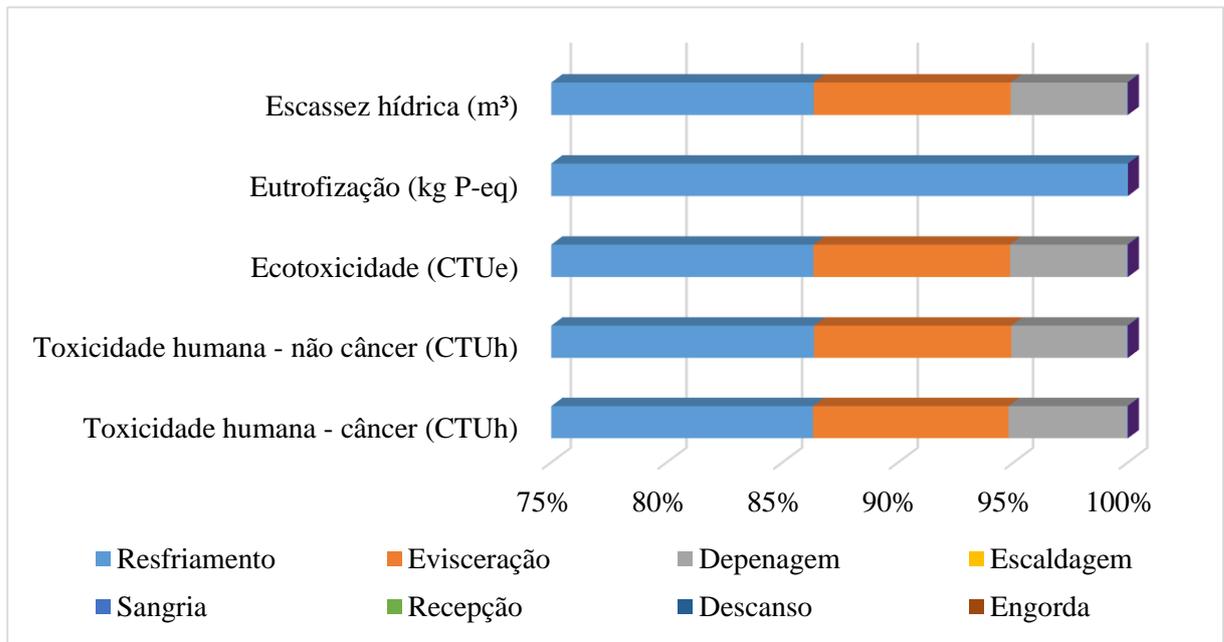
Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 14 mostra que o frango inteiro resfriado é o produto com maior geração de receita para a empresa, isso ocorre pela quantidade de produto que é destinado ao mercado, sabendo que o percentual de rendimento do frango inteiro resfriado é de 75,5% (Tabela 2).

Por meio dos dados da Tabela 14, foi possível mensurar a Pegada Hídrica considerando a receita dos produtos (frango inteiro resfriado, miúdos, pés) somados aos coprodutos (vísceras, penas e sangue). Vale ressaltar que os processos responsáveis pela geração desses produtos são: resfriamento (frango inteiro resfriado); evisceração (miúdos) (vísceras e partes não comestíveis); depenagem (pé de frango e penas) e sangria (sangue). Os demais processos elementares, a escaldagem, a recepção de aves e descanso das aves não gerem produtos ou coprodutos que possam ser destinados ao mercado, portanto, não geram receita para a empresa objeto de estudo. O Anexo H apresenta os resultados dos impactos potenciais recalculados para a nova unidade

funcional monetário e a Figura 26 apresenta os percentuais de impacto para cada uma das categorias estudadas.

FIGURA 26 - Análise de contribuição da Pegada Hídrica do frango inteiro resfriado (receita)



Fonte: Elaborado pela autora.

Na atividade de manufatura, o processo elementar com maior potencial de impacto aos recursos hídricos foi o resfriamento. O sistema de referência (kg) e o sistema com a mudança da UF (receita) tiveram resultados equivalentes em termos da identificação do processo *hotspots*.

Como o foco deste estudo está direcionado para o sistema de manufatura, buscou-se criar cenários alternativos que modificassem o consumo de energia na planta estudada, visto que este foi o *hotspots* do estudo, como mostra a seção 4.4.

#### 4.4 ANÁLISE DE CENÁRIOS E DE MELHORIAS PARA O CICLO DE VIDA DO PRODUTO

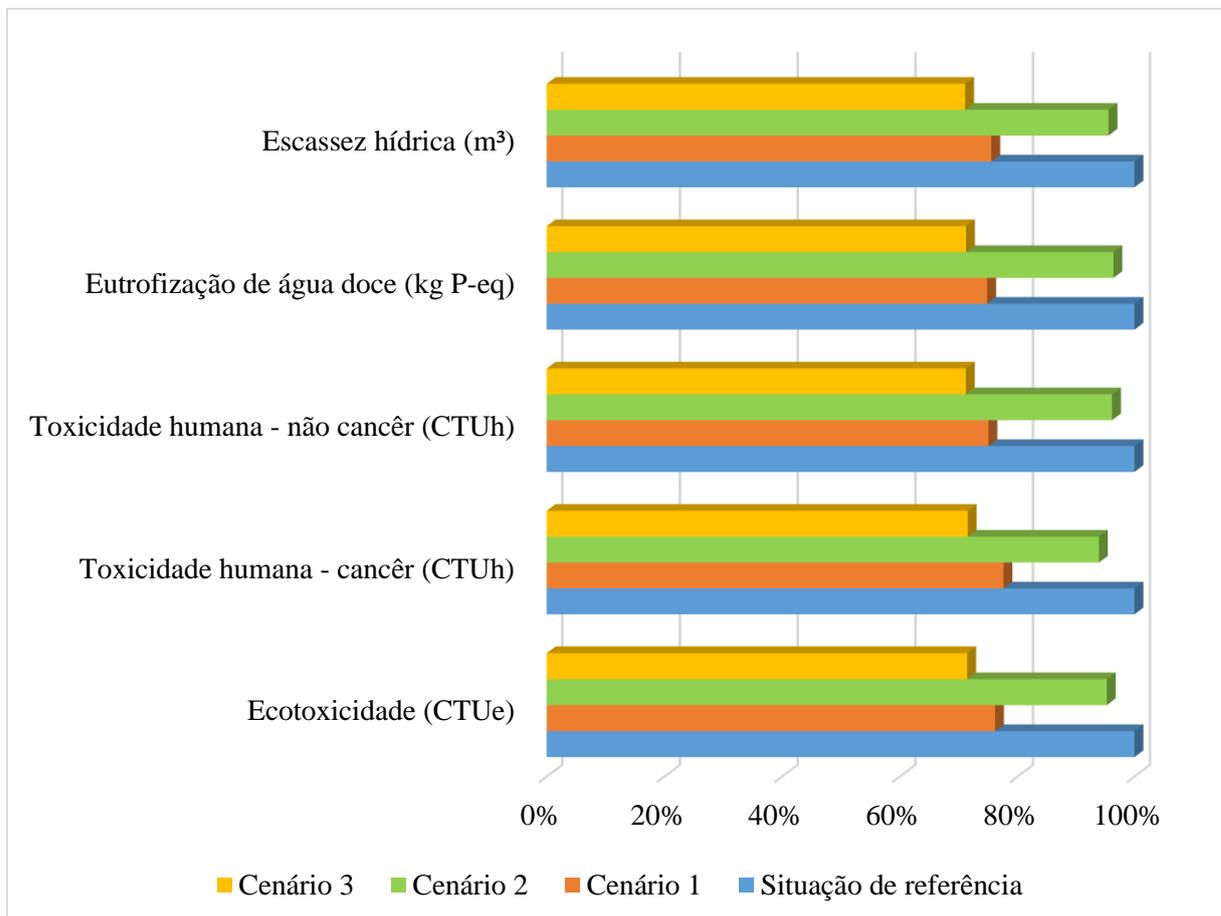
##### 4.4.1 Cenários modificando o consumo de energia e água na manufatura do produto

Foram construídos possíveis cenários de melhoria para reduzir a Pegada Hídrica na situação de referência (cenário atual pelo critério de alocação mássica) da produção do frango inteiro resfriado. Os cenários criados avaliaram as reduções dos impactos para cada categoria estudada. Dessa forma, foram criados diferentes cenários com a redução do consumo de energia e a redução do consumo de água nos processos elementares da manufatura, conforme previamente descritos na seção 3.2.4 e a seguir elencados:

- **Cenário 1:** com redução de 30% consumo de energia dos processos elementares da atividade de manufatura;
- **Cenário 2:** com redução de 40% da água utilizada no processo de higienização e redução de 20% da água aplicada nos processos elementares da manufatura;
- **Cenário 3:** redução de 30% do consumo de energia, redução de 40% do uso de água na higienização e de 20% do uso de água nos processos elementares da manufatura.

Os resultados de impactos para os cenários de melhoria considerando o sistema de produto *cradle-to-gate* são apresentados no Anexo F e podem ser visualizados na Figura 27, a seguir.

FIGURA 27 – Contribuição da Pegada Hídrica para os cenários 1, 2 e 3.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cenário 3 obteve os melhores resultados para redução da Pegada Hídrica em todas as categorias de impacto estudadas (Figura 28). Observou-se que medidas que reduzam o consumo de energia são fundamentais para a redução da Pegada Hídrica no sistema de manufatura. Isso pode ser confirmado pois os cenários que modificaram o consumo de energia foram os que reduziram de forma mais relevante a Pegada Hídrica.

A redução do uso da água nos processos elementares trouxe menores resultados para minimizar a Pegada Hídrica comparativamente aos cenários de melhoria focados na redução do consumo de energia. Isso ocorre devido o consumo de energia ser o principal fluxo de entrada gerador de impactos aos recursos hídricos, ou seja, quando se modifica o consumo do fluxo *hotspots* é possível alcançar melhores resultados para redução da Pegada Hídrica. Porém, os demais fluxos (consumo de água) não devem ser excluídos, pois também auxiliaram na redução dos impactos potenciais, o que se mostra ser um outro caminho para melhorar o uso da água e aumentar a sustentabilidade ambiental dos processos.

#### **4.4.2 Cenário focado na avaliação da Pegada de Escassez Hídrica**

O cenário 4 foi avaliado separadamente dos outros cenários por tratar apenas uma categoria de impacto, a escassez hídrica. Essa avaliação buscou analisar qual seria o impacto da planta estudada se ela estivesse localizada em diferentes posições geográficas dentro do Brasil. Como o modelo AWARE não traz o FC para as diferentes regiões brasileiras, foi utilizado a regionalização dos FC realizados por Andrade et al (2019) para o Brasil que traz FC para regiões hidrográficas do Brasil.

Para este estudo foram considerados os FCs para quatro regiões hidrográficas do país, para comparação com os resultados de impacto de escassez hídrica gerados no sistema de referência (cenário atual). O sistema de referência foi calculado utilizando o FC nacional dado pelo AWARE, que é de 2,17.

Foram selecionadas as regiões hidrográficas Tocantins-Araguaia por ser a região onde a empresa estudada está inserida. A região da bacia do Paraná foi selecionada por se tratar de uma região onde concentram grande parte das indústrias brasileiras, a região do São Francisco por ser próxima a região onde a planta está inserida e a região hidrográfica Parnaíba por possuir um FC crítico quando comparado aos demais. A Tabela 15 apresenta os FCs para diferentes regiões do Brasil e os resultados para escassez hídrica nas respectivas regiões assumidas.

TABELA 15 - Comparação de cenários para diferentes FC para a categoria de escassez hídrica

Regiões Hidrográficas	Referência	FC anual (non agri)	PEH
			(m <sup>3</sup> /kg)
Situação de referência	AWARE	2,17	12,28
Tocantins-Araguaia	Andrade et al. (2019)	3,1	12,290
Paraná	Andrade et al. (2019)	17,6	12,413
São Francisco	Andrade et al. (2019)	18,7	12,423
Parnaíba	Andrade et al. (2019)	34	12,553

Fonte: Elaborado pela autora.

Houve uma variação da PEH para as diferentes regiões do Brasil. Por meio dessa análise foi possível constatar que a avaliação por meio do FC nacional acarretou um menor impacto para escassez hídrica. Diante disso, pode-se considerar que esse FC pode mostrar uma falsa segurança hídrica do país. A região hidrográfica que gerou menor impacto para escassez foi a região onde a empresa está inserida (região hidrográfica Tocantins-Araguaia), com um resultado bem próximo do FC nacional.

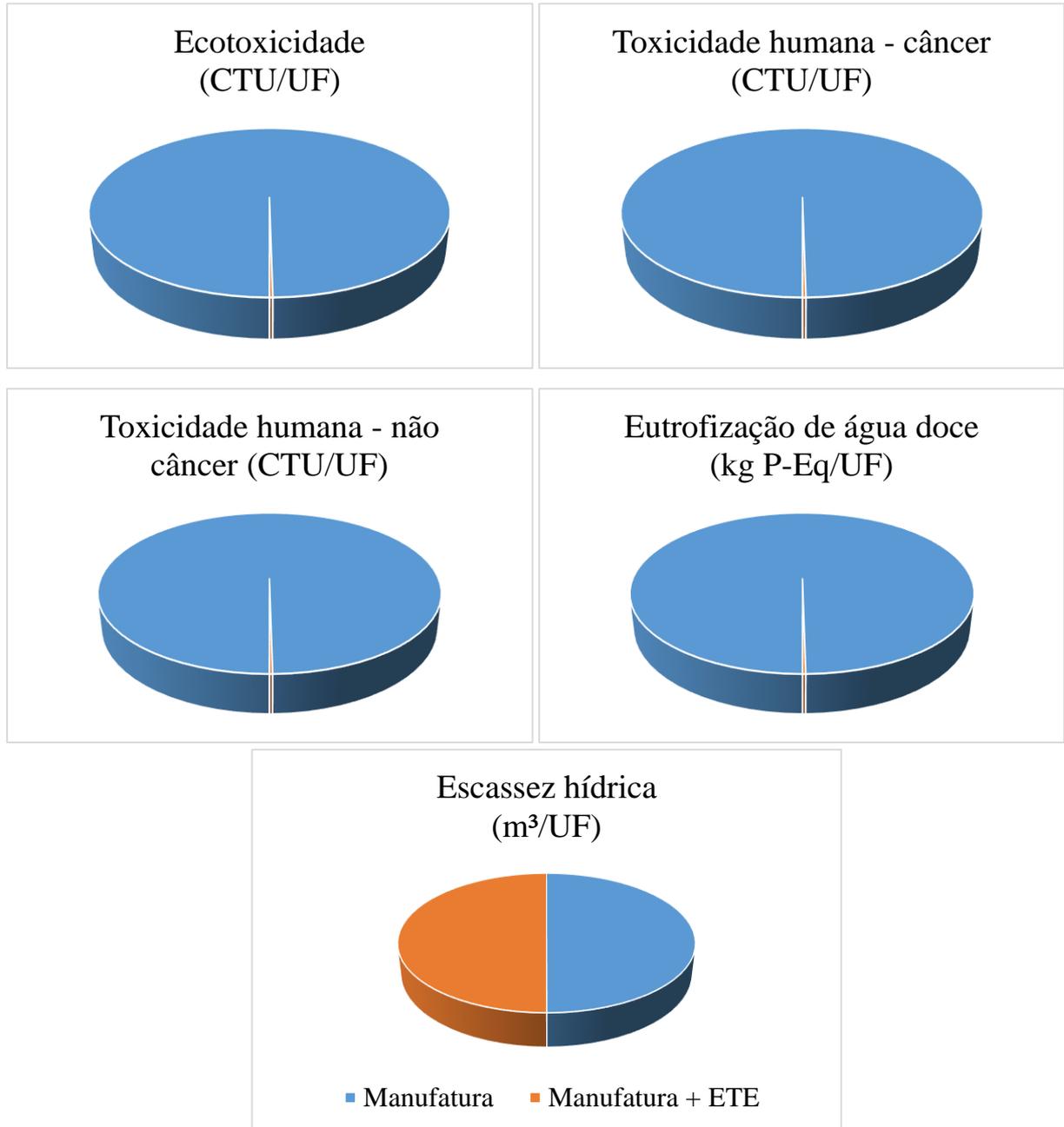
Diante disso, pode-se afirmar que é fundamental realizar estudos de localização no ato da instalação dessas unidades industriais, visto que o potencial de impacto por unidade de produto posto no mercado pode variar consideravelmente dependendo da região geográfica escolhida, principalmente em regiões com maior risco de escassez hídrica. É importante ressaltar que os fatores FC adotados a partir do modelo AWARE, mesmo regionalizados, eles ainda consideram regiões vastas e com distintas características. Portanto, é necessário melhorar essa informação no modelo AWARE para que os cálculos possam ser ainda mais e mais bem regionalizados a partir das distintas condições geográficas e diferenças climáticas do país.

#### 4.4.3 Cenário de avaliação da Pegada Hídrica incluindo o tratamento de efluentes

Esse cenário buscou avaliar quais os impactos que o efluente gerado no sistema de manufatura geraria aos recursos hídricos e qual a redução desses impactos após o tratamento realizado pela empresa objeto de estudo. O sistema de tratamento modelado é realizado em duas etapas, inicia-se pelo tratamento físico químico e segue para posterior tratamento em lagoas biológicas, duas anaeróbicas e duas facultativas. A definição do sistema de tratamento pode alterar os resultados dessa avaliação, portanto esse foi incluso como cenário. Os resultados para essa avaliação estão presentes no Anexo J.

A Figura 28 apresenta o percentual de impactos para cada uma das categorias analisadas nesse estudo, sendo considerados o sistema de manufatura sem tratamento e após o tratamento do efluente gerado, seguindo os dados da Tabela 1.

FIGURA 28 - Avaliação da Pegada Hídrica do sistema de tratamento de efluente



Fonte: Elaborado pela autora.

Para as categorias de impacto de eutrofização de água doce, ecotoxicidade e toxicidade humana (câncer e não câncer) a ETE reduziu os impactos em mais de 99%. Quanto à categoria de escassez hídrica os valores foram bem próximos, sendo o tratamento de efluente mais

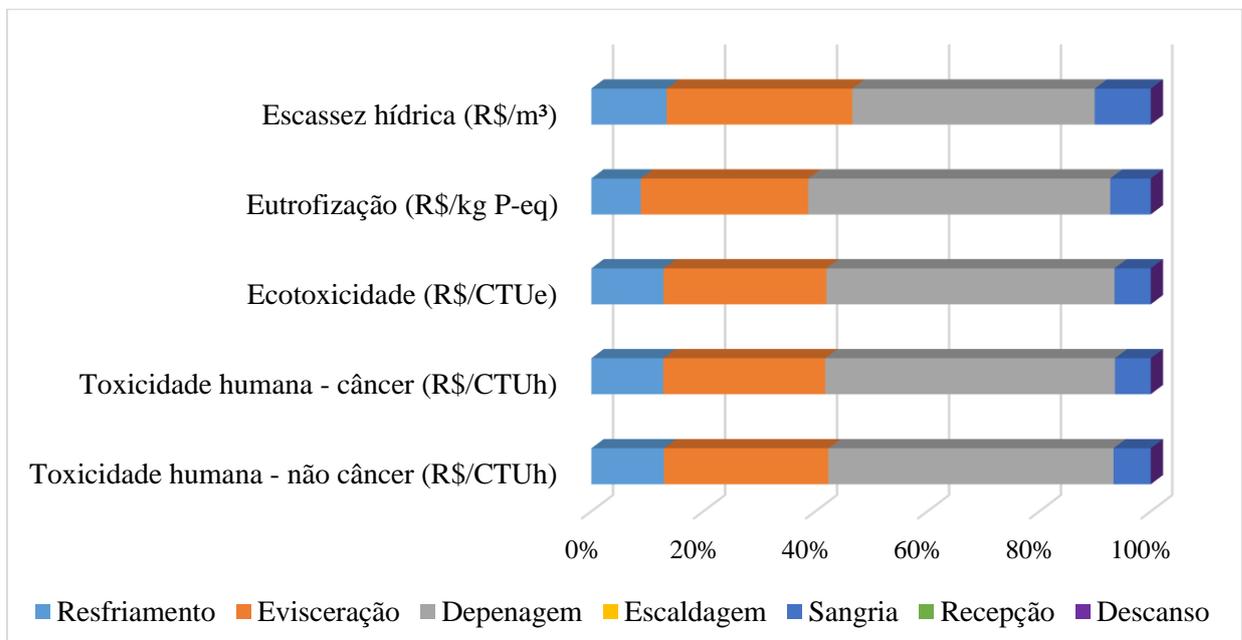
impactante, visto que há necessidade de uso de água tratada para mistura com polímero e incorporação de água ao lodo. Porém esse valor (0,0003 m<sup>3</sup>/UF) é extremamente pequeno comparado aos benefícios que esse processo gera aos recursos hídricos. Somente para escassez hídrica que a engorda continuou como o processo mais impactante.

Nessa avaliação é possível notar a importância de inserir estudos sobre a Pegada Hídrica no contexto da ACV, que avalia outras categorias de impactos hídricos além da avaliação volumétrica para o sistema de manufatura. Uma vez que as atividades de manufatura podem ter maior potencial de degradação à água e assim afetar o ecossistema e a sociedade local. Outra importância é que a degradação também acarreta na escassez hídrica, por inviabilizar o uso e consumo do recurso hídrico disponível.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

Por meio dos resultados obtidos na avaliação da ecoeficiência do sistema de manufatura (Anexo J) é possível afirmar que a depenagem foi o processo mais ecoeficiente. A Figura 29 mostra os percentuais da ecoeficiência para o sistema de referência, utilizando os resultados de impactos da Pegada Hídrica presentes (Anexo E) e os valores dos produtos no mercado (Tabela 2).

FIGURA 29 - Percentuais da avaliação da ecoeficiência para o sistema de referência



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 29 mostra que o processo de depenagem representa cerca de 52% da avaliação da ecoeficiência. O segundo processo elementar mais ecoeficiente foi a evisceração seguidos pelo resfriamento, e o processo de sangria foi o menos ecoeficiente.

A maior ecoeficiente da depenagem deve-se principalmente ao baixo valor dos impactos gerados nesse processo quando comparado aos outros processos elementares da atividade de manufatura e o “alto” valor monetário (R\$) dos pés de frango que são gerados no processo, que representa 39% do valor (R\$) de todos os produtos obtidos na produção do frango inteiro resfriado. Já o resultado da ecoeficiência para evisceração deve-se ao fato que seus produtos representam 37% do valor monetário (R\$) do total de produtos obtidos na produção do frango inteiro resfriado, um pouco menos que o valor gerado na depenagem (40%).

Portanto, os processos menos ecoeficientes da atividade manufatura foram a sangria e o resfriamento. A baixa ecoeficiência da sangria está associada ao baixo valor (R\$) que o sangue possui no mercado consumidor, já o resfriamento está associado aos “altos” valores de impactos associados nesse processo elementar. Dessa forma, é fundamental buscar medidas que reduzam os impactos hídricos no processo de resfriamento e buscar medidas que possam aumentar o valor (R\$) do sangue no mercado, ou meios de agregar mais valor (R\$) ao produto.

Porém é importante ressaltar que o sangue mesmo com um baixo valor de mercado, a sua venda e processamento devem ser analisados com um meio de destinação e agregação de valor para um produto que poderia gerar custos empresariais para o tratamento e disposição final. Outro aspecto relevante que o sangue se não destinado de forma correta tem grande potencial de impacto ambiental, como no caso de despejo em corpos hídricos.

Comparando-se os *hotspots* ambientais os da ecoeficiência, observa-se que eles diferem. Os processos menos ecoeficientes foram o resfriamento e a sangria, enquanto na avaliação da Pegada Hídrica os *hotspots* ambientais foram resfriamento e evisceração. O resfriamento foi um processo crítico nas duas avaliações, portanto deve-se buscar meios para redução de impactos nesse processo e melhorar o preço de venda do frango inteiro resfriado para o mercado. Uma medida que é executada pela empresa para agregar mais valor ao frango inteiro resfriado é por meio da agregação de valor ao produto na produção de cortes de frango.

Assim, incluir o valor dos produtos no estudo se mostrou relevante, pois as conclusões sobre onde melhorar no ciclo de vida do produto estudo foram alteradas. Logo, os cenários de melhoria previamente discutidos na seção 4.4.1, poderiam ter sido distintos, caso os *hotspots*

tivessem sido inicialmente orientados aos resultados da ecoeficiência e não apenas da avaliação da Pegada Hídrica.

Por meio da avaliação da ecoeficiência envolvendo os processos unitários da atividade de manufatura se mostrou relevante por identificar de forma simultânea os processos elementares que podem ser melhorados para obter vantagens econômicas e ambientais dentro do ambiente empresarial. Sendo um meio de adquirir informações para tomadas de decisão no quesito de tornar a empresa mais sustentável e competitiva.

## 5 CONCLUSÕES

Por meio da revisão de literatura, foi possível apresentar a relevância do desenvolvimento de estudos sobre a avaliação da ecoeficiência e a avaliação da Pegada Hídrica envolvendo atividades de manufatura. Durante a análise bibliométrica, foi possível identificar que houve um crescimento no número de publicações sobre Pegada Hídrica, sendo 77% dos documentos publicados nos últimos cinco anos. Além disso, foi possível constatar que a maioria dos estudos ainda estão concentrados no setor agropecuário e as pesquisas no Brasil ainda estão incipientes na área. A aplicação da abordagem metodológica da ISO14046:2014 ainda é menos explorada na literatura comparativamente à abordagem do indicador de Pegada Hídrica proposto pelo WFN. Assim, mais estudos envolvendo a recente normativa da série ISO são desejáveis. A presente dissertação de mestrado contribuiu nesta direção.

Quanto o setor de aplicação da Pegada Hídrica, os setores alimentícios e de biocombustíveis foram os mais representativos, sendo esses fortemente ligados as atividades agrícolas e pecuárias, que são as cadeias produtivas de maior consumo de água. Quanto à categoria de impacto, a escassez hídrica foi a mais estudada, seguida da categoria de eutrofização de água doce e de ecotoxicidade de água doce. Por fim, na RBS conduzida não foram identificados estudos sobre a ecoeficiência na manufatura e a aplicação combinada com a avaliação da Pegada Hídrica, o que serviu de motivação para o presente estudo realizado.

Sobre a avaliação da Pegada Hídrica, por meio da análise do inventário de Pegada Hídrica da empresa estudada, foi possível concluir que o processo de evisceração e resfriamento da carcaça foram os maiores consumidores de energia e água, assim como os maiores geradores de efluente para o ciclo de vida *cradle-to-gate* da produção de 1kg de carne de frango inteiro resfriado. A avaliação de impactos hídricos do frango inteiro resfriado adotou os critérios de alocação mássica e alocação econômica para as categorias de impacto de eutrofização da água doce, escassez hídrica, ecotoxicidade, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena. Nessa avaliação, foi possível verificar que a engorda das aves foi o processo com maior potencial de impacto para quatro categorias (ecotoxicidade, toxicidade humana cancerígena, eutrofização de água doce e escassez hídrica). A produção de grãos foi o aspecto ambiental que mais impactou os recursos hídricos dentro do sistema de produto avaliado.

Ao associar o tempo do processo de engorda das aves ao tempo da atividade de manufatura da carne de frango na Unidade Funcional do estudo, houve alterações significativas nos processos *hotspots* identificados. Nessa abordagem, o processo de resfriamento das aves passou a ser o

mais potencialmente danoso, seguido do processo de evisceração. Essa avaliação mostrou a importância de associar o tempo aos impactos de um processo, visto que, a atividade de manufatura consome altos volumes de água em curto espaço de tempo, quando comparada a atividade agrícola e pecuária.

Na busca por alternativas que reduzissem os impactos ambientais calculados, foram criados cenários com foco na modificação do perfil de consumo dos fluxos mais danosos aos recursos hídricos, identificados nesse estudo, a água e a energia elétrica. O cenário com maior redução de impactos estava associado a redução de 30% no consumo de energia, redução de 20% de água utilizada nos processos industriais e 40% no consumo de água destinada para higienização. Nesse cenário a redução foi de aproximadamente 30% dos impactos para todas as categorias estudadas.

Depois disso, buscou-se avaliar o impacto de escassez hídrica para diferentes regiões do Brasil, considerando distintos fatores de caracterização (FC) dados pelo modelo AWARE. Nessa avaliação foi possível verificar que o percentual e variação para a Pegada de Escassez Hídrica por quilograma de frango inteiro resfriado para quatro diferentes regiões hidrográficas do Brasil foi pequeno.

No cenário de adoção da UF considerando o valor monetário da receita anual (R\$) do ano de 2018 da empresa avaliada, foram encontrados resultados semelhantes ao cenário atual com as alocações, quanto os processos com maiores potenciais de impacto aos recursos hídricos. A engorda das aves foi o processo mais impactante para o sistema estudado e o resfriamento foi o processo mais danoso quando se associou os resultados de impactos aos tempos de processamento.

Por fim, foi feita a avaliação da ecoeficiência do sistema estudado. Nessa avaliação considerou-se os resultados de impacto da escassez hídrica, ecotoxicidade, toxicidade humana e eutrofização matematicamente combinados ao valor do produto. Sendo o valor do produto determinado pelo valor médio (R\$) de venda de 1 kg de cada produto (frango resfriado e demais coprodutos). Na avaliação, verificou-se que a engorda das aves foi a menos ecoeficiente, devido aos resultados mais altos para as categorias de impacto. Quando analisado somente os processos da manufatura, a sangria foi o processo menos ecoeficiente, devido ao baixo valor monetário (R\$) do produto gerado no processo (sangue), o processo de resfriamento também obteve baixa ecoeficiência devido aos valores dos impactos hídricos gerados nesse processo. Os processos mais ecoeficientes foram a depenagem seguido da evisceração, o que se deve ao valor monetário

gerada na venda de pés de frango (depenagem) e na venda de miúdos (moela, coração e fígado). Assim, foi verificada uma modificação nos *hotspots* ambientais a partir da inclusão da avaliação da ecoeficiência neste estudo. Logo, ao se sugerir cenários de melhoria ao ciclo de vida de um produto, é preciso decidir se a metodologia de pesquisa incluirá ou não a ecoeficiência no estudo, visto que distintos resultados e sugestões poderão surgir a partir dessa decisão metodológica.

Portanto, os dois critérios de alocação foram semelhantes quanto a identificação dos *hotspots* ambientais. A adoção da UF dada pela receita anual (R\$) foi mais crítica do que a situação de referência, pois enfatizou os *hotspots* existentes e sem a necessidade de alocar os resultados da avaliação da pegada hídrica. Já a alteração da UF para 1 hora de produção alterou todos os *hotspots* ambientais, enaltecendo mais a manufatura em contrapartida da engorda das aves. A inclusão da avaliação da ecoeficiência pode alterar os *hotspots* ambientais – no estudo de caso, o processo de sangria passou a se destacar como *hotspot* em contrapartida à avaliação da pegada hídrica. Quanto aos cenários de modificação do uso e consumo da água e energia, esses tiveram efeitos praticamente linear. O cenário de modificação geográfica das bacias obteve percentuais de alteração semelhantes para todas as regiões hidrográficas avaliadas e a inclusão da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) no estudo mostrou o benefício desse processo nas atividades de manufatura.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. P. et al. Water scarcity in Brazil: part 1—regionalization of the AWARE model characterization factors. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: 2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: 2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14045**: 2014 Avaliação da ecoeficiência de sistemas de produto — Princípios, requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) – Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017. Brasília, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) - Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2015. Brasília, 2015.
- ARSENAULT, N.; TYEDMERS, P.; FREDEEN, A. Comparing the environmental impacts of pasture-based and confinement-based dairy systems in Nova Scotia (Canada) using life cycle assessment. **International journal of agricultural sustainability**, v. 7, n. February, p. 19–41, 2009.
- BAI, X. et al. Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 132, n. July 2017, p. 369–375, 2018.
- BARBOSA, E. et al. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 448–456, 2017.
- BERGER, M. et al. Water footprint of European cars: Potential impacts of water consumption along automobile life cycles. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 7, p. 4091–4099, 2012.
- BONAMENTE, E. et al. The water footprint of the wine industry: Implementation of an assessment methodology and application to a case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 9, p. 12190–12208, 2015.
- BONAMENTE, E. et al. Environmental impact of an Italian wine bottle: Carbon and water footprint assessment. **Science of the Total Environment**, v. 560–561, p. 274–283, 2016.
- BOULAY, A. M. et al. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1–11, 2017.

- BRASIL. Resolução CONAMA n° 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (1998) Portaria n° 210 de 10 de novembro de 1998. Regulamento Técnico da Inspeção Tecnológica e Higiênico-Sanitária de Carne de Aves. Brasília.
- BUENO, E. D. O.; MELLO, C. R.; ALVES, G. J. Evaporation from Camargo's hydropower plant reservoir: water footprint characterization. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 570–575, 2016.
- CALDERÓN, L. A. et al. The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry. **Resources, Conservation and Recycling The**, v. 54, p. 1196–1207, 2010.
- CARNEIRO, J. et al. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2018.
- CASTRO, A. L. et al. Applicability and relevance of water scarcity models at local management scales: Review of models and recommendations for Brazil. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 72, p. 126–136, 2018.
- CESAR, J. et al. Impact of roughage-concentrate ratio on the water footprints of beef feedlots. **Agricultural Systems**, v. 155, n. May, p. 126–135, 2017.
- CESARI, V. et al. Environmental impact assessment of an Italian vertically integrated broiler system through a Life Cycle approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 904–911, 2017.
- CHAPAGAIN, A. K.; ORR, S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 2, p. 1219–1228, 2009.
- CHEN, J. L.; CHEN, Y. B.; HUANG, H. C. Quantifying the life cycle water consumption of a machine tool. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 498–501, 2015.
- CHEROENNET, N. et al. A trade-off between carbon and water impacts in bio-based box production chains in Thailand: A case study of PS, PLAS, PLAS/starch, and PBS. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, n. 2017, p. 987–1001, 2018.
- CHICO, D.; SANTIAGO, A. D.; GARRIDO, A. Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 2, 2015.
- COELHO, D. C. et al. Comparison of the water footprint of two hydropower plants in the Tocantins River Basin of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 164–175, 2017.
- COSTA, D. C. et al. Temporal dynamics of the water footprint. of soybean hub grains in Western Pará, Amazon. **Ambiente & Sociedade**, v. 13, p. 1–15, 2018.
- DE FIGUEIRÊDO, M. C. et al. **PRODUÇÃO DE MELÃO e mudanças climáticas Sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica**. Brasília, DF:

Embrapa, 2017.

DE FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Reducing the impact of irrigated crops on freshwater availability: The case of Brazilian yellow melons. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 2, p. 437–448, 2014.

DURATEX. **Duratex - Relatório Anual 2017**. Disponível em: <[http://www.duratex.com.br/Relatorio-Anual-2017/pdf/Duratex\\_RA\\_17.pdf](http://www.duratex.com.br/Relatorio-Anual-2017/pdf/Duratex_RA_17.pdf)>. Acesso em: 03 de janeiro de 2019.

EMPINOTTI, V.; TADEU, N.; MARTINS, R. Análise crítica da Pegada Hídrica Cinza na produção de celulose. **Ambiente & Água**, v. 8, p. 166–177, 2013.

FACHINELLI, N.; PEREIRA JR, A. Biomass and Bioenergy Impacts of sugarcane ethanol production in the Paranaíba basin water resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 8–16, 2015.

FROST, K.; HUA, I. **A Spatially Explicit Assessment of Water Use by the Global Semiconductor Industry**. IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). **Anais...2017**

GERBENS-LEENES, P. W.; MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. **Water Resources and Industry**, v. 1–2, p. 25–36, 2013.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOEDKOOOP, M. et al. Eutrophication. In: STRIETMAN, H. (Ed.). **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. 1. ed. [s.l.: s.n.]. p. 58–66.

GOMIERO, T. et al. Environmental Impact of Different Agricultural Management Practices: Conventional vs. Organic Agriculture. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 30, p. 95–124, 2011.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Life Cycle Assessment of broiler chicken production: A Portuguese case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 74, p. 125–134, 2014.

GRÁCIO, M. C. C.; OLIVEIRA, E. F. T. Estudos de análise de cocitação de autores: uma abordagem teórico-metodológica para a compreensão de um domínio. **XIV Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação (ENANCIB)**, 2013.

GU, Y. et al. Calculation of water footprint of the iron and steel industry: A case study in Eastern China. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 274–281, 2015.

HERATH, I. et al. Water footprinting of agricultural products: evaluation of different protocols using a case study of New Zealand wine. **Journal of Cleaner Production**, v. 44, p. 159–167, 2013.

HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. A. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. **Brazilian Bioethanol Science**, p. 241–252, 2014.

HERTWICH, E. et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, p. 1–6, 2013.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual Setting the Global Standard**. Londres: Earthscan, 2011.

HOSSEINIAN, S. M.; NEZAMOLESAMI, R. Water footprint and virtual water assessment in cement industry: A case study in Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2454–2463, 2016.

HUANG, J. et al. Water availability footprint of milk and milk products from large-scale dairy production systems in Northeast China. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 91–97, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). Manual do Sistema ILCD – Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos. Brasília, 2014.

IBIDHI, R. et al. Water, land and carbon footprints of sheep and chicken meat produced in Tunisia under different farming systems. **Ecological Indicators**, v. 77, p. 304–313, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14046** - environmental management – water footprint – principles, requirements and guidelines. Genebra, 2014.

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC) - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) **Handbook: recommendations for life cycle impact assessment in the European context**. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.

KANDANANOND, K. The utilization of water footprint to enhance the water saving awareness: Case study of a ceramic product. **International Journal of GEOMATE**, v. 14, n. 46, p. 107–112, 2018.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO<sub>2</sub>PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 69–78, 2012a.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO<sub>2</sub>PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: Case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 242–251, 2012b.

KICHERER, A. et al. Eco-Efficiency Combining Life Cycle Assessment and Life Cycle Costs via Normalization. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 7, p. 537–543, 2007.

KLEMES, J. Industrial water recycle/reuse. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 1, p. 238–245, 2012.

- LATHUILLIÈRE, M. J. et al. Environmental footprints show China and Europe' s evolving resource appropriation for soybean production in Mato Grosso, Brazil. **Environmental Research Letters**, p. 1–12, 2014.
- LEINONEN, I. et al. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. **Poultry Science**, v. 91, n. 1, p. 26–40, 2012.
- LÓPEZ-ANDRÉS, J. J. et al. Environmental impact assessment of chicken meat production via an integrated methodology based on LCA, simulation and genetic algorithms. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 477–491, 2018.
- MA, X. et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for Kraft wood pulp paper production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, n. December 2017, p. 253–261, 2018a.
- MA, X. et al. Life cycle assessment and water footprint evaluation of crude steel production: A case study in China. **Journal of Environmental Management**, v. 224, n. July, p. 10–18, 2018b.
- MACCARTHY, B.L.; FERNANDES, F.C.: A multidimensional Classification of Production Systems for the Design and Selection of Production Planning and Control Systems. *Production Planning & Control*, v.11, n.5, 2000.
- MANFREDI, M.; VIGNALI, G. Life cycle assessment of a packaged tomato puree: a comparison of environmental impacts produced by different life cycle phases. **Journal of Cleaner Production**, v. 73, p. 275–284, 2014.
- MANZARDO, A. et al. Integration of water footprint accounting and costs for optimal chemical pulp supply mix in paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 72, p. 167–173, 2014.
- MARQUES, T. L. et al. Pegada Hídrica em sistemas de manufatura: estado da arte e tendências. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**, 2018.
- MATOS, R. M. DE et al. Sustainability of the grey water footprint (GWF) for cultivation of onion in the Brazilian semi-arid regions. **Australian Journal of Crops Science**, v. 11, n. 06, p. 749–756, 2017.
- MEKONNEN, M. et al. Water, Energy, and Carbon Footprints of Bioethanol from the U. S. and Brazil. **Environmental science & technology**, v. 52, p. 14508–14518, 2018.
- MEKONNEN, M. et al. Water productivity in meat and milk production in the US from 1960 to 2016. **Environment International**, v. 132, n. August, 2019.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A Y. National Water Footprint Accounts. **Unesco - Institute for water education**, v. 1, n. 16, p. 80, 2011.
- MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, n. x, 2013.
- MILÀ I CANALS, L. et al. Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I - Inventory modelling and characterization factors for the main impact pathways. **International Journal of**

**Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 1, p. 28–42, 2009.

MORELLI, B. et al. Critical Review of Eutrophication Models for Life Cycle Assessment. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 17, p. 9562–9578, 2018.

MOUSAVI, S.; KARA, S.; KORNFELD, B. Assessing the impact of embodied water in manufacturing systems. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 80–85, 2015.

MUNASINGHE, M.; JAYASINGHE, P.; DERANIYAGALA, Y. Value – Supply Chain Analysis (VSCA) of crude palm oil production in Brazil, focusing on economic, environmental and social sustainability. **Sustainable Production and Consumption**, v. 17, p. 161–175, 2019.

NEMECEK, T. et al. Life cycle assessment of Swiss farming systems: I. Integrated and organic farming. **Agricultural Systems**, v. 104, n. 3, p. 217–232, 2011.

NORTHEY, S. A. et al. The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. **Global Environmental Change**, v. 44, n. March, p. 109–124, 2017.

NORTHEY, S.; HAQUE, N.; MUDD, G. Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 118–128, 2013.

NOYA, I. et al. Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. **Journal of Environmental Management**, v. 171, p. 133–143, 2016.

NUNEZ, P.; JONES, S. Cradle to gate: life cycle impact of primary aluminium production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 11, p. 1594–1604, 2016.

OCAK, S.; ÖĞÜN, S.; EMSEN, E. Turkey's Animal Production Water Footprint; Heading in the Wrong Direction. **Procedia Technology**, v. 8, n. Haicta, p. 255–263, 2014.

OCTAVIA, C.; LAURENCE; HARTONO, N. Water footprint and life cycle assessment of concrete roof tile and brick products at PT. XYZ. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 109, n. 1, 2018

PAGE, G.; RIDOUTT, B.; BELLOTTI, B. Fresh tomato production for the Sydney market: An evaluation of options to reduce freshwater scarcity from agricultural water use. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 18–24, 2011.

PAGE, G.; RIDOUTT, B.; BELLOTTI, B. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 219–226, 2012.

PALHARES, C. J. Pegada Hídrica dos suínos abatidos nos Estados da Região Centro-Sul do Brasil. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 33, p. 309–314, 2011.

PALHARES, J. C. P. Pegada Hídrica de suínos e o impacto de estratégias nutricionais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 533–538, 2014.

PALHARES, J. C.; PEZZOPANE, M. Water footprint accounting and scarcity indicators of conventional and organic dairy production systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 299–307, 2015.

- PAN, S. Y. et al. Assessing the environmental impacts and water consumption of pretreatment and conditioning processes of corn stove hydrolysate liquor in bio refineries. **Energy**, v. 116, p. 436–444, 2016.
- PAYANDEH, Z. et al. Joint data envelopment analysis and life cycle assessment for environmental impact reduction in broiler production systems. **Energy**, v. 127, n. 2, p. 768–774, 2017.
- PELLETIER, N. Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. **Agricultural Systems**, v. 98, n. 2, p. 67–73, 2008.
- PFISTER, S. et al. Projected water consumption in future global agriculture: Scenarios and related impacts. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 20, p. 4206–4216, 2011.
- PFISTER, S.; BAYER, P. Monthly water stress: Spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. **Journal of Cleaner Production**, v. 73, p. 52–62, 2014.
- PFISTER, S.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 11, p. 4098–4104, 2009.
- PRUDÊNCIO DA SILVA, V. et al. Environmental impacts of French and Brazilian broiler chicken production scenarios: An LCA approach. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 222–231, 2014.
- PUTMAN, B. et al. A retrospective analysis of the United States poultry industry: 1965 compared with 2010. **Agricultural Systems**, v. 157, n. July, p. 107–117, 2017.
- RIDOUTT, B. G.; PFISTER, S. A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 204–207, 2013.
- RIDOUTT, B. et al. Climate Change Adaptation Strategy in the Food Industry — Insights from Product Carbon and Water Footprints. **Climate**, v. 4, n. 26, p. 1–14, 2016.
- RINALDI, S. et al. Water and carbon footprint of wine: Methodology review and application to a case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 7, p. 1–17, 2016.
- RODRIGUEZ, G. et al. Biofuel-water-land nexus in the last agricultural frontier region of the Brazilian Cerrado. **Applied Energy**, v. 231, n. September, p. 1330–1345, 2018.
- 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. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 7, p. 532–546, 2008.
- SANDIN, G.; PETERS, G. M.; SVANSTRÖM, M. Moving down the cause-effect chain of water and land use impacts: An LCA case study of textile fibres. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 104–113, 2013.
- SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in

- Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4576–4584, 2016a.
- SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1318–1327, 2016b.
- SCHNEIDER, V. E.; HELENA, S.; CARRA, Z. Pegada Hídrica dos suínos abatidos na região do Corede Serra, RS, Brasil. **Ambiente & Água**, v. 11, p. 211–224, 2016.
- SEMMENS, J.; BRAS, B.; GULDBERG, T. Vehicle manufacturing water use and consumption: An analysis based on data in automotive manufacturers' sustainability reports. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 246–256, 2014
- SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. H.; PONGPAT, P. Environmental sustainability of oil palm cultivation in different regions of Thailand: Greenhouse gases and water use impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1009–1019, 2017.
- SILVA, D. A.L. Avaliação do ciclo de vida de produção do painel de madeira MDP no Brasil 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Silva, D.A.L; Ometto, A.R; Garcia, R.P; Freire, F.M.C.S; Varanda, L.D; Christoforo, A.L. Life cycle assessment of wood-based composites: state-of-the-art and opportunities for reducing environmental impacts. In: Lahr, F.A.R, Savastano, J; Fiorelli, J. **Non-conventional Building Materials based on agro-industrial wastes**. Bauru, SP: Bauru, SP: Tiliform, 2015. p.143-178
- SILVA, V. D. P. R. et al. Medições e modelagem da Pegada Hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 521–526, 2015.
- SKUNCA, D. et al. Life cycle assessment of the chicken meat chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 440–450, 2018.
- SOCOLOF, M. L.; OVERLY, J. G.; GEIBIG, J. R. Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 1281–1294, 2005.
- SOUSA, V. M. Z. et al. Life cycle assessment of biodiesel production from beef tallow in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, p. 1837–1850, 2017.
- STRASBURG, V. J.; JAHNO, V. D. Sustentabilidade de cardápio: avaliação da Pegada Hídrica nas refeições de um restaurante universitário. **Ambiente & Água**, v. 10, p. 904–914, 2015.
- STRASBURG, V. J.; JAHNO, V. D. Application of eco-efficiency in the assessment of raw materials consumed by university restaurants in Brazil: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 178–187, 2017.
- SUBRAMANIAM, V.; HASHIM, Z. Charting the water footprint for Malaysian crude palm oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 675–687, 2018.
- TSOLAKIS, N.; SRAI, J. S.; AIVAZIDOU, E. Blue water footprint management in a UK

poultry supply chain under environmental regulatory constraints. **Sustainability Switzerland**, v. 10, n. 3, 2018.

TAGLIAFERRI, C. et al. Shale gas: a life-cycle perspective for UK production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 6, p. 919–937, 2017.

UNITED NATIONS. World Population Prospects 2019. Disponível em: <[https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_10KeyFindings.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_10KeyFindings.pdf)>. Acesso em: 10 de agosto de 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM - SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (UNEP-SETAC). **Life Cycle Management: a business guide to sustainability**. Paris, 2007.

VASILAKI, V. et al. Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 504–516, 2016.

VAN MIDDELAAR, C. E. et al. Eco-efficiency in the production chain of Dutch semi-hard cheese. **Livestock Science**, v. 139, n. 1–2, p. 91–99, 2011.

VERFAILLIE, H. A.; BIDWEL, R. **Criar Mais Valor Com Menos Impacto**. Lisboa: World Business Council on Sustainable Development, 2000.

VIEIRA, A. et al. Water footprint of the Sobradinho hydropower plant, Northeastern Brazil. **Água & Ambiente**, p. 1–10, 2018.

VIOLA, E. S. et al. Água na avicultura: importância, qualidade e exigências. **Manejo ambiental na avicultura**. Concórdia, p. 226, 2011.

WIEDEMANN, S. G.; MCGAHAN, E. J.; MURPHY, C. M. Resource use and environmental impacts from Australian chicken meat production. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 675–684, 2017.

WITHERS, P. J. A. et al. Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? **Sustainability (Switzerland)**, v. 6, n. 9, p. 5853–5875, 2014.

WOJCIKIEWICZ, C. A. et al. Pegada Hídrica cinza de sistema de cultivo intensivo de camarão-branco em água salobra. **Boletim Instituto de Pesca**, v. 43, n. 3, p. 426–436, 2017.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 1995. Eco-efficient leadership for improved economic and environmental performance. Disponível em :<<http://www.wbcd.ch/DocRoot/DIFMcUZj32ZOMj5xNMXq/eeleadership.pdf>>. Acesso em: 8 de fevereiro de 2018.

WFN – WATER FOOTPRINT NETWORK, 2019. Aims & history. Disponível em: <<https://waterfootprint.org/en/about-us/aims-history/>>. Acesso em: 13 março de 2018.

WULCA- WATER USE LIFE CYCLE ASSESSMENT, 2019. Consensus-based method development to assess water use in LCA – WULCA. Disponível em: <<http://wulca-waterlca.org/aware.html>>. Acesso em: 6 de fevereiro de 2019.

ZHU, Z., WANG, K., ZHANG, B. Applying a network data envelopment analysis model to quantify the eco-efficiency of products: a case study of pesticides. *Journal of Cleaner Production*, v.69, p. 67- 73.

YIN, R.K. Estudo de Caso – Planejamento e Métodos. Bookman, 5ª ed, Porto Alegre, 2015.

## ANEXO A – Passos para cálculo de avaliação de Pegada Hídrica pelo grupo WFN

$$PH_{azul} = \text{Evaporação} + \text{Incorporação} + \text{Vazão de retorno perdida} \quad \left[ \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \right] \quad (1)$$

$$PH_{verde} = \text{Evaporação} + \text{Incorporação} \quad \left[ \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \right] \quad (2)$$

$$PH_{cinza} = \frac{L}{(C_{max} - C_{nat})} \quad \left[ \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} \right] \quad (3)$$

No cálculo da Pegada Hídrica azul, a vazão de retorno perdida na Equação 1 refere-se à água que não está disponível para reutilização dentro da mesma bacia hidrográfica e no mesmo período da retirada. A Pegada Hídrica azul é expressa em volume de água por unidade de tempo e dividida pela quantidade de produto por unidade de tempo, pode também ser expressa em volume de água por quantidade de produto.

A Pegada Hídrica verde na Equação 2 corresponde à quantidade de água da chuva consumida durante um processo produtivo, sendo especialmente importante para os produtos agrícolas (Hoekstra et al. 2011). Já na PH cinza (Equação 3), as seguintes variáveis são consideradas:

- L: refere-se a carga de poluente (massa/tempo);
- $C_{max}$ : concentração do padrão ambiental de qualidade da água para o poluente analisado (massa/volume);
- $C_{nat}$ : corresponde a concentração natural no corpo hídrico receptor (massa/volume);

Já Equação 4 apresenta o cálculo da Pegada Hídrica para produtos segundo o modelo da WFN, a partir do somatório da Pegada Hídrica dos processos utilizando as Equações 1 a 3:

$$PH_{prod}[p] = \left( PH_{proc}[p] + \frac{\sum_{i=1}^y PH_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) \times f_v[p] \quad \left[ \frac{volume}{massa} \right] \quad (4)$$

Sendo:

- $PH_{prod}[p]$  é a PH do produto final [p];
- $PH_{prod}[i]$  é a PH do insumo [i];
- $PH_{proc}[p]$  é a PH do processo, calculados com base nas Equações de 1 a 3;
- $f_p[p, i]$  refere-se à fração do produto que é processado a partir do insumo [i];
- $f_v[p]$  refere-se à fração de valor do produto final (normalmente expresso a partir de valores monetários).

O valor de  $f_v[p]$  é dado pela razão entre o valor de mercado do produto e o valor de mercado de todos os produtos provenientes do insumo [i] (Hoekstra et al. 2011). Esses valores são apresentados nas Equações 5 e 6.

$$f_p[p, i] = \frac{peso[p]}{peso[i]} \quad \left[ \frac{massa}{massa} \right] \quad (5)$$

$$f_v[p] = \frac{preço[p] \times peso[p]}{\sum_{p=1}^z (preço[p] \times peso[p])} \quad \left[ \frac{\$}{\$} \right] \quad (6)$$

## ANEXO B – Passos para realização da revisão sistemática da literatura

- Definir problema: Quais os estudos sobre a Pegada Hídrica nos sistemas de manufatura;
- Definir termos de busca:

<b>Termos de busca para revisão bibliográfica sobre Pegada Hídrica na manufatura</b>	
ACV	<i>"Life cycle assessment" or "LCA" or "ISO 14040" or "ISO 14044"</i>
Pegada Hídrica	<i>"water footprint" or "WFA" or "ISO 14046" or "water scarcity footprint" or "freshwater scarcity" or "freshwater eutrophication" or "water eutrophication" or "water ecotoxicity" or "freshwater ecotoxicity" or "human toxicity" or "freshwater ecotoxicity" or "water degradation"</i>
Manufatura	<i>"manufacturing" or "manufacture" or "factory" or "industrie" or "industry"</i>

- Definir base de dados: Scopus e Web of Science;
- Definir critérios de avaliação: Artigos e periódicos de conferência de todos os documentos publicados até outubro de 2018 e todas as línguas.

### ANEXO C - Protocolo para realização do estudo de caso

<b>Etapa</b>	<b>Atividade desenvolvida</b>
Introdução ao estudo de caso	Levantar dados sobre as indústrias relevantes para aplicação do estudo de avaliação da Pegada Hídrica;
	Definir empresas com uso relevantes de água em suas atividades;
Procedimentos da coleta de dados	Enviar e-mail/carta de apresentação do projeto para empresas em busca de parceria para coleta de dados;
	Definir a empresa, processos de manufatura e produto objeto de estudo;
	Definir locais de visita, cronograma de atividades e ferramentas para coleta de dados de inventário;
Esboço do relatório do estudo de caso	Identificar com a aplicação do estudo de caso, como os resultados poderão auxiliar para minimizar impactos ambientais relacionados ao uso de água sob a perspectiva de ciclo de vida de produto;
	Calcular a ecoeficiência da empresa e sugerir oportunidades de melhoria para a empresa estudada.
Questões para coleta de dados no estudo de caso	Qual é o consumo e o retorno de água necessário em cada etapa do sistema de manufatura?
	Quais os principais poluentes descartados devido ao consumo de água?
	Quais são as fontes de água utilizadas pela empresa (água verde, azul, cinza)?
	Como o consumo de água é gerenciado internamente na empresa estudada?

**ANEXO D – Carta de apresentação para realização do estudo de caso****CARTA DE APRESENTAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DO ESTUDOS DE CASO**

A empresa \_\_\_\_\_,

Sorocaba/SP, \_\_\_\_ de 2018.

**Assunto:** Pedido de apoio para realização de trabalho de Mestrado.

Por meio da proposta aqui representada pelo **Eng<sup>a</sup>. Thamiris Linhares Marques** atualmente aluna regular do programa de pós-graduação em Mestrado, no curso de Engenharia de Produção na Universidade Federal de São Carlos, campus de Sorocaba; e representada pelo orientador **Prof. Dr. Diogo Aparecido Silva Lopes**, respeitosamente solicitamos apoio, nos termos que seguem, para realização do Projeto de Pesquisa intitulado: **Avaliação da Pegada Hídrica em sistemas de manufatura: estudo de caso, hotspots ambientais e ecoeficiência.**

A ajuda que necessitamos diz respeito à disponibilização de dados referentes ao processo de fabricação de um produto produzido pela empresa. Estes dados seriam coletados em visitas técnicas e/ou em entrevistas com pessoa específica ou grupo de pessoas da empresa, na atribuição de transmitir as informações solicitadas. Ressaltamos que a coleta de dados se baseia na obtenção de informações como:

- Definição do produto/processo que será estudado: fornecer dados sobre as características do produto escolhido;
- Mapeamento do processo de fabricação do produto escolhido: fornecer dados desde a entrada de insumos e matérias-primas, dos processos de manufatura envolvidos, até a saída do produto final;
- Consumo de água, materiais, energia e subprodutos/resíduos gerados;

Não existe o intuito de entrar no mérito de práticas específicas e sigilosas da empresa.

Uma vez deferida esta solicitação e realizada a colaboração para a concretização deste projeto de pesquisa, como **benefícios** que a empresa poderá obter listamos:

- Disponibilização de dados sobre o desempenho ambiental do produto estudado, com ênfase no uso sustentável de recursos hídricos em todas as etapas do seu ciclo de vida;
- Identificação de eventuais oportunidades para melhorar os aspectos ambientais do produto estudado. Essas informações podem ser importantes, principalmente para a área de Desenvolvimento de Produtos;
- Contribuições para a ecoeficiência e melhoria contínua do produto e do processo de fabricação, especialmente, quanto ao desempenho ambiental.

Se julgar necessário, podemos realizar contato, por exemplo, via telefone , para esclarecer melhor a estrutura de funcionamento e benefícios previstos com a realização deste trabalho. Por favor, se for este o caso, **não existe em solicitar este contato pessoal de comunicação.**

Desde já agradecemos e ficamos à disposição para o caso de dúvidas.

Atenciosamente,

**Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva**

Universidade Federal de São Carlos  
Campus Sorocaba  
Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba  
diogo.apls@ufscar.br  
Tel.: +55 15 3229-74

**Thamiris Linhares Marques**

Universidade Federal de São Carlos  
Campus Sorocaba  
Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba  
thamirislinhares@hotmail.com  
Tel.: +55 62 99648-9498

**ANEXO E – Resultado para avaliação da Pegada Hídrica da situação de referência**

	<i>Toxicidade humana - câncer (CTUh)</i>	<i>Toxicidade humana - não câncer (CTUh)</i>	<i>Ecotoxicidade (CTUe)</i>	<i>Eutrofização (kg P-eq)</i>	<i>Escassez hídrica (m<sup>3</sup>)</i>
Resfriamento	8,45E-10	7,20E-09	4,85E-02	1,20E-05	1,65E-01
Evisceração	6,05E-10	5,20E-09	3,49E-02	5,77E-06	1,19E-01
Depenagem	1,96E-10	1,63E-09	1,11E-02	1,79E-06	3,76E-02
Escaldagem	2,38E-10	1,88E-09	1,35E-02	2,11E-06	4,11E-02
Sangria	7,00E-11	6,16E-10	4,10E-03	6,24E-07	1,40E-02
Recepção	2,36E-10	2,08E-09	1,38E-02	2,34E-06	4,74E-02
Descanso	8,64E-11	6,74E-10	4,71E-03	7,02E-07	1,58E-02
Engorda	7,14E-08	2,10E-08	1,03E+01	7,59E-04	1,18E+01

**ANEXO F – Resultado para avaliação da Pegada Hídrica da situação de referência para o critério de alocação econômica**

	<i>Toxicidade humana - câncer (CTUh)</i>	<i>Toxicidade humana - não câncer (CTUh)</i>	<i>Ecotoxicidade (CTUe)</i>	<i>Eutrofização (kg P-eq)</i>	<i>Escassez hídrica (m<sup>3</sup>)</i>
Resfriamento	8,4E-10	7,2E-09	4,8E-02	1,0E-05	1,7E-01
Evisceração	6,5E-10	5,6E-09	3,7E-02	0,0E+00	1,3E-01
Depenagem	2,2E-10	1,8E-09	1,2E-02	0,0E+00	4,2E-02
Escaldagem	2,6E-10	2,1E-09	1,5E-02	1,0E-05	4,6E-02
Sangria	8,0E-11	7,0E-10	4,7E-03	0,0E+00	1,6E-02
Recepção	2,7E-10	2,4E-09	1,6E-02	0,0E+00	5,4E-02
Descanso	9,9E-11	7,7E-10	5,4E-03	0,0E+00	1,8E-02
Engorda	7,5E-08	2,4E-08	1,1E+01	8,1E-04	1,2E+01

**ANEXO G – Resultados da Avaliação da Pegada Hídrica para os cenários 1, 2, 3.**

	<i>Situação de referência</i>	<i>Cenário 1</i>	<i>Cenário 2</i>	<i>Cenário 3</i>
Ecotoxicidade (CTUe)	1,31E-01	9,95E-02	1,24E-01	9,33E-02
Toxicidade humana - câncer (CTUh)	2,28E-09	1,77E-09	2,14E-09	1,63E-09
Toxicidade humana - não câncer (CTUh)	1,93E-08	1,45E-08	1,85E-08	1,37E-08
Eutrofização de água doce (kg P-Eq)	2,13E-05	1,60E-05	2,06E-05	1,52E-05
Escassez hídrica por país (m <sup>3</sup> )	4,40E-01	3,33E-01	4,21E-01	3,13E-01
Escassez hídrica por bacia (m <sup>3</sup> )	9,99E-01	7,48E-01	9,62E-01	7,11E-01

**ANEXO H – Impactos da avaliação da Pegada Hídrica a partir da receita da empresa estudada**

	<i>Toxicidade humana - câncer (CTUh)</i>	<i>Toxicidade humana - não câncer (CTUh)</i>	<i>Ecotoxicidade (CTUe)</i>	<i>Eutrofização (kg P-eq)</i>	<i>Escassez hídrica (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Receita</i>
Resfriamento	3,37E-18	2,88E-17	1,94E-10	4,80E-14	6,60E-10	R\$250.402.784
Evisceração	1,78E-17	1,53E-16	1,02E-09	1,69E-13	3,50E-09	R\$34.079.253
Depenagem	3,80E-18	3,16E-17	2,15E-10	3,48E-14	7,29E-10	R\$51.549.154
Escaldagem						
Sangria	7,74E-17	6,81E-16	4,54E-09	6,90E-13	1,55E-08	R\$903.937
Recepção						
Descanso						
Engorda						
<b>Manufatura</b>	<b>1,02E-16</b>	<b>8,94E-16</b>	<b>5,97E-09</b>	<b>9,43E-13</b>	<b>2,04E-08</b>	<b>R\$ 336.935.128</b>

**ANEXO I – Avaliação da Pegada Hídrica incluindo o sistema de tratamento de efluentes**

<i>Categoria de impacto</i>	<i>Efluente Bruto</i>	<i>Efluente tratado</i>	<i>Manufatura</i>	<i>Manufatura + ETE</i>
Eutrofização de água doce (kg P-Eq/UF)	9,78E+00	2,37E-02	9,78E+00	2,38E-02
Ecotoxicidade (CTU/UF)	1,32E+05	3,18E+02	1,32E+05	3,18E+02
Toxicidade humana - câncer (CTU/UF)	9,16E-04	2,23E-06	9,16E-04	2,23E-06
Toxicidade humana - não câncer (CTU/UF)	2,77E-04	8,09E-07	2,77E-04	8,28E-07
Escassez hídrica (m <sup>3</sup> /UF)	-1,76E-02	-1,73E-02	4,23E-01	4,23E-01

**ANEXO J – Avaliação da ecoeficiência**

	<i>Toxicidade humana - câncer (R\$/CTUh)</i>	<i>Toxicidade humana - não câncer (R\$/CTUh)</i>	<i>Ecotoxicidade (R\$/CTUe)</i>	<i>Eutrofização (R\$/kg P-eq)</i>	<i>Escassez hídrica (R\$/m<sup>3</sup>)</i>		<i>(R\$/kg)</i>
Resfriamento	4,97E+09	5,83E+08	8,67E+01	3,49E+05	2,54E+01	R\$	4,20
Evisceração	1,13E+10	1,31E+09	1,96E+02	1,18E+06	5,74E+01	R\$	6,83
Depenagem	1,96E+10	2,36E+09	3,47E+02	2,14E+06	1,02E+02	R\$	3,84
Escaldagem	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	R\$	-
Sangria	2,57E+09	2,92E+08	4,39E+01	2,88E+05	1,28E+01	R\$	0,18
Recepção	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	R\$	-
Descanso	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	R\$	-
Engorda	4,48E+07	1,52E+08	3,12E-01	4,22E+03	2,71E-01	R\$	3,20
<b>Manufatura</b>	<b>3,84E+10</b>	<b>4,54E+09</b>	<b>673,1526</b>	<b>3959146</b>	<b>197,6026182</b>		