



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**



**ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA
AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA UTILIZANDO A PEGADA HÍDRICA**

GABRIELLE DE ARAÚJO RIBEIRO

**CAMPINA GRANDE - PB
2019**

GABRIELLE DE ARAÚJO RIBEIRO

**ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA
AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA UTILIZANDO A PEGADA HÍDRICA**

Tese de doutorado submetida ao Curso de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – PB, em cumprimento das exigências para obtenção do Título de Doutora em Recursos Naturais.

Área de Concentração: Sociedade e Recursos Naturais

Linha de Pesquisa: Gestão dos Recursos Naturais

Orientador: Prof. Dr. José Dantas Neto

**CAMPINA GRANDE - PB
2019**

R484a Ribeiro, Gabrielle de Araújo.
Análise de sustentabilidade ambiental na agroindústria canavieira utilizando a pegada hídrica / Gabrielle de Araújo Ribeiro. – Campina Grande, 2019.
126 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. José Dantas Neto".
Referências.

1. Recursos hídricos. 2. Agrotóxicos. 3. Cana-de-açúcar. I. Dantas Neto, José. II. Título.

CDU 556.18(043)

GABRIELLE DE ARAÚJO RIBEIRO

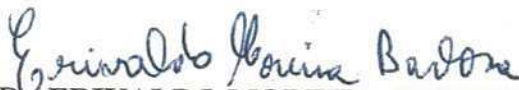
“ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA
AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA UTILIZANDO A PEGADA HÍDRICA”.

APROVADA EM: 22/02/2019

ASSINATURA DA BANCA EXAMINADORA



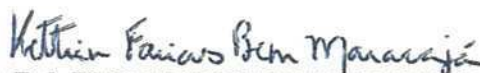
Prof. Dr. **JOSÉ DANTAS NETO**
Orientador principal



Prof. Dr. **ERIVALDO MOREIRA BARBOSA**
Examinador



Prof. Dr. **SERGIO MURILO SANTOS DE ARAÚJO**
Examinador



Prof.^a. Dr.^a. **KETTRIN FARIAS BEM MARACAJÁ**
Examinadora



Prof. Dr. **LINCOLN ELOI DE ARAÚJO**
Examinador

*A meus pais Ronaldo e Givaneide
e a meu irmão Marcelino.
Pelo amor eterno, ensinamentos, apoio e confiança em toda minha vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

“Ninguém escapa ao sonho de voar, de ultrapassar os limites do espaço onde nasceu, de ver novos lugares e novas gentes. Mas saber ver em cada coisa, em cada pessoa, aquele algo que a define como especial, um objeto singular, um amigo, é fundamental. Navegar é preciso, reconhecer o valor das coisas e das pessoas, é mais preciso ainda.”

Antoine de Saint-Exupéry “O pequeno príncipe”

A **DEUS** por trilhar meu caminho, dando-me força nos momentos que me encontrei incapaz de prosseguir.

Pelo apoio incondicional, agradeço a meus pais (**Ronaldo e Givaneide**) e a meu irmão (**Marcelino**) que estão sempre presentes em minha vida, e por serem exemplos de determinação e perseverança. Agradeço por todo amor que me dedicaram e educação que me proporcionaram. Os amarei sempre!

Ao grupo das cearenses, que a UFCG me apresentou, (**Bete, Dani, Deise, Inácia, Jaci, Luzia e Nalva**), nossas oportunas conversas descontraídas sempre compartilharam experiências. Juntas, sonhamos e testemunhamos o sucesso de cada uma.

À **Usina Central Olho D'Água S/A**, por conceder o desenvolvimento desta tese, em especial ao engenheiro **Dr. Marcos Mendonça**, pela sua disponibilidade, ajuda e conhecimento compartilhado.

Ao professor **Dr. José Dantas Neto**, pela sua orientação, apoio, opiniões, críticas, pelo conhecimento compartilhado e compreensão durante minha vida no doutorado.

Ao professor **Dr. Vicente de Paulo Rodrigues** pelos ensinamentos.

Aos **docentes** participantes da banca examinadora, agradeço pela colaboração.

À **Pós-Graduação em Recursos Naturais** da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo acolhimento e a **Capes** (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior) pelo auxílio concedido.

O resultado desta tese advém de um processo de encontros de pessoas, que sem o apoio, incentivo e conhecimento não se teria tornado uma realidade. Serei eternamente grata.

"Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe de tudo.
Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa.
Por isso aprendemos sempre".

Paulo Freire.

RESUMO

RIBEIRO, Gabrielle de Araújo. **Análise da sustentabilidade ambiental na agroindústria canavieira utilizando a pegada hídrica**. 2019.126f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

A pegada hídrica é um conceito atual que indica o consumo direto e indireto de água em um processo, produto ou área delimitada. Atualmente, o setor agrícola é o maior responsável pelo uso mundial de água, sendo necessário, portanto, estudos que apresentem a pegada hídrica (PH) dessa atividade. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a PH como indicador de sustentabilidade ambiental, da agroindústria canavieira no município de Camutanga, Pernambuco, inserida na sub-bacia hidrográfica do rio Capibaribe Mirim. A avaliação da PH foi realizada de acordo com a metodologia do manual de avaliação da PH e ISO 14046:2014, seguindo as etapas de definição de objetivos e escopo, cálculo da PH, avaliação da sustentabilidade e medidas para redução da PH. A análise da PH foi realizada a partir dos dados do cultivo de cana-de-açúcar e da fabricação dos subprodutos, etanol e açúcar, referente a primeira safra (2016/2017) e segunda safra (2017/2018), da Usina Olho D'Água. Para tanto, contabilizou-se a PH verde, azul e cinza da agroindústria canavieira. Para o mapeamento do uso e ocupação do solo da área, utilizado na análise da sustentabilidade da PH verde, aplicou-se o índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN). Para o estudo da sustentabilidade ambiental da PH, para as referidas safras e uma série histórica de 2000 a 2017, considerou-se os períodos seco, chuvoso, mensal e safra completa. Os indicadores utilizados para a avaliação da sustentabilidade ambiental da PH foram a escassez de água verde (EA_{verde}), escassez de água azul (EA_{azul}) e nível de poluição da água (NPA). As medidas propostas para a redução da PH foram priorizadas para as pegadas que apresentaram-se insustentáveis. Por fim, analisou-se todos os poluentes utilizados nas duas safras, afim de identificar o menos prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano, através do NPA e das classificações quanto a toxicidade ao ser humano e periculosidade ambiental. Os resultados apresentaram uma PH total para a cana-de-açúcar de 2364,87 m^3/t e 1043,92 m^3/t , sendo a maior contribuição dada pela componente cinza, com 86% e 75%, para primeira e segunda safra respectivamente. Quanto a PH do processo de fabricação dos produtos, o etanol obteve maior PH com aproximadamente 10 m^3/t , enquanto o açúcar foi 4,7 m^3/t em média para as duas safras. Na área da sub-bacia hidrográfica do rio Capibaribe Mirim, onde está inserida a usina, prevaleceu o uso de áreas agrícolas, com 41,28%, enquanto o espelho de água com 0,52% da área total da sub-bacia. Diante desses valores do uso e ocupação do solo, a EA_{verde} apresentou-se sustentável para todos os períodos estudados. Quanto EA_{azul} , foram identificados pontos insustentáveis apenas nos períodos seco e mensal nas duas safras. O NPA da agroindústria canavieira apresentou-se insustentável na maioria dos períodos, com valores, para a safra completa de 1221,93% e 798,28%, sendo representados pelos agrotóxicos Diurom 800 e Imazapique, na ordem de primeira e segunda safra. Concluiu-se que o uso da PH para a análise da sustentabilidade ambiental da agroindústria canavieira, proporcionou entender a relação dessa atividade com os recursos hídricos na sub-bacia Capibaribe Mirim, auxiliando na gestão da água para a região. Este estudo foi o primeiro a analisar a sustentabilidade ambiental da PH do cultivo de cana-de-açúcar, utilizando-se como poluentes críticos os efeitos dos agrotóxicos.

Palavras chaves: Agrotóxicos; Recursos Hídricos. Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

RIBEIRO, Gabrielle de Araújo. **Analysis of environmental sustainability in the sugarcane agroindustry using the water footprint**. 2019. 126f. Thesis (doctorate in natural resources) - Federal University of Campina Grande, 2019.

Water footprint (WF) is a concept that represents the direct and indirect consumption of water in a given process, product, or area. Currently, the agricultural sector is the main consumer of water worldwide; therefore, studies are necessary the WF of this industry. The objective of the present study is to evaluate WF as an indicator of the environmental sustainability of the sugarcane agroindustry in the municipality of Camutanga, Pernambuco, located in the sub-basin of the Capibaribe Mirim river. The WF assessment was performed according to the WF methodology manual and ISO 14046:2014 with the following steps goal, setting and scope, WF calculation, sustainability assessment, and WF reduction measures. The WF analysis was based on data regarding sugarcane cultivation and the production of ethanol and sugar, from the first crop (2016/2017) and second crop (2017/2018) from the Usina Olho D'Água. For this analysis, the green, blue, and gray WF of the sugarcane agroindustry was evaluated. In the sustainability analysis of the green WF, the normalized difference vegetation index (NDVI) was used for mapping land use and occupation. In studying the environmental sustainability of WF with respect to the examined crops and a historical series from 2000 to 2017, dry, rainy, monthly, and harvest seasons were considered. The indicators used to assess the environmental sustainability of WF consisted of green water scarcity (WS_{green}), blue water scarcity (WS_{blue}), and the water pollution level (WPL). In addition, the proposed measures for reducing WF were prioritized for unsustainable footprints. Finally, using the WPL and the classification of human and environmental toxicity, the pollutants used in the two harvests were analyzed to identify the ones least harmful to humans and the environment. The results revealed a total WF of sugarcane amounting to 2364.87 m³/t and 1043.92 m³/t for the first and second crops, respectively, with the largest contribution generated by the gray component at levels of 86% and 75%, respectively. In the product manufacturing process, ethanol obtained a higher WF of approximately 10 m³/t, while sugar obtained a WF of 4.7 m³/t on average for the two harvests. In the hydrographic sub-basin of the Capibaribe Mirim river in which the Usina Olho D'Água is located, the use of agricultural areas prevailed at 41.28%, while the water mirror with 0.52% of the total area of sub-basin. These values for land use and occupation indicate that WS_{green} was sustainable for the studied periods. Unsustainable points regarding WS_{blue} were identified only in the dry and monthly periods of the two harvests. The WPL of the sugarcane agroindustry was unsustainable for the majority of periods, with values of 1221.93% and 798.28% for the first and second crops, respectively, represented by the pesticides Diurom 800 and Imazapique. Concluded that the use of the WF to analyze the environmental sustainability of the sugarcane agroindustry succeeded in providing an understanding of the relationship between the industry and water resources in the Capibaribe Mirim sub-basin, aiding in the water management of the region. This study was the first to examine the effects of pesticides as critical pollutants in analyzing the environmental sustainability of the WF of sugarcane cultivation.

Key words: Pesticides; Water resources. Sugar cane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fases da avaliação da Pegada Hídrica.....	42
Figura 2: Recorte geográfico da sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.....	50
Figura 3: Perfil de Argissolo Vermelho Eutrófico abruptico, textura média (leve) /argilosa, A moderado, fase relevo suave ondulado.....	51
Figura 4: Esquema metodológico geral.....	54
Figura 5: Fluxograma da utilização da água na usina, com valores em m ³ /dia.....	61
Figura 6: Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Capibaribe Mirim.....	87
Quadro 1: Questões críticas que devem ser postas para a avaliação da sustentabilidade da pegada de água.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Consumo da água pela cana-de-açúcar, obtido pelo método de campo por diversos autores.	28
Tabela 2: Coeficiente da cultura (K_c) para diferentes estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	28
Tabela 3: Valores de K_c para cana-planta.....	29
Tabela 4: Pegada Hídrica da produção agrícola em alguns países.....	33
Tabela 5: Pegada Hídrica da produção agrícola em algumas bacias hidrográficas.....	33
Tabela 6: Os 10 principais países exportadores e importadores de água virtual.....	44
Tabela 7: Ingredientes ativos permitidos no cultivo de cana-de-açúcar de acordo com o AGROFIT.....	48
Tabela 8: Fatores que influenciam o potencial da vazão de lixiviação dos agrotóxicos. O estado do fator que determina o potencial de lixiviação e escoamento é expresso como um valor entre 0 e 1.....	59
Tabela 9: Agrupamento das áreas para uso e ocupação do solo.....	63
Tabela 10: Prioridades na redução da pegada hídrica.....	69
Tabela 11: Comparação das componentes da pegada hídrica da cana-de-açúcar para diferentes autores em m^3/t e suas respectivas contribuições em %.	74
Tabela 12: Cálculo da pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar, considerando apenas o nitrogênio.....	75
Tabela 13: Agrotóxicos utilizados na safra I (2016/2017) e II (2017/2018) e suas características.....	77
Tabela 14: Taxa de aplicação de agrotóxico (TAQ) utilizados na cultura de cana-de-açúcar para a safra 2016/2017.....	78
Tabela 15: Taxa de aplicação de agrotóxico (TAQ) utilizados na cultura de cana-de-açúcar para a safra 2017/2018.....	78
Tabela 16: Potencial de lixiviação (S) e pesos (w), por agrotóxico, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo na safra 2016/2017.....	79
Tabela 17: Potencial de lixiviação (S) e pesos (w), por agrotóxico, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que	

influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo na safra 2017/2018.....	80
Tabela 18: Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos usados no cultivo de cana-de-açúcar para a safra 2016/2017.	82
Tabela 19: Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos usados no cultivo de cana-de-açúcar para a safra 2017/2018.	82
Tabela 20: Pegada hídrica azul no processo de fabricação do etanol.....	83
Tabela 21: Pegada hídrica azul no processo de fabricação do açúcar.	84
Tabela 22: Resultado da pegada hídrica para o produto etanol nas Safras I (2016/2017) e II (2017/2018).....	84
Tabela 23: Resultado da pegada hídrica para o produto açúcar nas Safras I (2016/2017) e II (2017/2018).....	85
Tabela 24: PH do produto etanol em L de água por L de etanol.	85
Tabela 25: Pegada hídrica dos produtos Etanol e Açúcar para diferentes autores.	86
Tabela 26: Sustentabilidade ambiental durante o período seco.....	88
Tabela 27: Sustentabilidade ambiental durante o período chuvoso.	89
Tabela 28: Disponibilidade de água verde e azul e escoamento real da bacia.	89
Tabela 29: Fração de lixiviação/escoamento (α) para a safra 2016/2017.	126
Tabela 30: Fração de lixiviação/escoamento (α) para a safra 2017/2018.	126

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Temperatura (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), médias, para a região Camutanga, PE, no período de setembro de 2015 a setembro de 2017.	52
Gráfico 2: Precipitação pluvial (mm/mês) e evapotranspiração de referência (ET _o), na região de Camutanga, PE, no período de setembro de 2015 a setembro de 2017.	53
Gráfico 3: Pegada hídrica verde, azul e cinza para a cana-de-açúcar, em m ³ /t, na 1 ^o e 2 ^o safra.....	72
Gráfico 4: Contribuição da pegada hídrica verde, azul e cinza para a cana-de-açúcar, em m ³ /t, na 1 ^o e 2 ^o safra.	73
Gráfico 5: Contribuição da PH cinza com nitrogênio e com agrotóxicos, na PH total, para as safras I e II.....	76
Gráfico 6: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica verde da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra I (2016/2017) de cana-de-açúcar.....	91
Gráfico 7: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica verde da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra II (2017/2018) de cana-de-açúcar.....	92
Gráfico 8: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica azul da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra I (2016/2017) de cana-de-açúcar.....	93
Gráfico 9: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica azul da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra II (2017/2018) de cana-de-açúcar.....	94
Gráfico 10: PH azul e vazão média mensal para a safra I (2016/2017), na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.....	96
Gráfico 11: PH azul e vazão média mensal para a safra II (2017/2018), na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.....	96
Gráfico 12: NPA dos agrotóxicos utilizados na primeira safra (2016/2017).	99
Gráfico 13: NPA dos agrotóxicos utilizados na segunda safra (2017/2018).....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AGEITEC	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
AGROFIT	Sistema de Agrotóxico Fitossanitários
ANA	Agência Nacional das Águas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CCME	Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente
C_{máx}	Concentração Máxima Aceitável dos Agrotóxicos
C_{nat}	Concentração Natural no Corpo Hídrico
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
DA	Disponibilidade de Água
DHC	Demanda Hídrica
DVA	Demanda de Vazão Ambiental
EA_{azul}	Escassez de Água Azul
EA_{verde}	Escassez de Água Verde
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
EPI	Índice de Performance Ambiental
ESI	Índice de Sustentabilidade Ambiental
ET_c	Evapotranspiração da Cultura
ET₀	Evapotranspiração de Referência
EU	União Europeia
EVI	Índice de Vulnerabilidade Ambiental
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
INERIS	Instituto Nacional do Meio Ambiente e Riscos Industriais
ISAM	Índice de Sustentabilidade Ambiental Multidimensional
ISO	Organização Internacional de Normalização
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NIR	Reflectância da Banda do Infravermelho Próximo
NPA	Nível de Poluição da Água
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
P_{eff}	Precipitação Efetiva
PH	Pegada Hídrica
PH_{azul}	Pegada Hídrica Azul
PH_{cana}	Pegada Hídrica da Cana-de-açúcar
PH_{cinza}	Pegada Hídrica Cinza
PH_{verde}	Pegada Hídrica Verde
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPDB	Base de Dados de Propriedades de Pesticidas
Q_{nat}	Escoamento Natural
Q_{real}	Escoamento Real
RED	Reflectância da Banda do Vermelho
SECTMA-PE	Secretaria de ciência , tecnologia e meio ambiente de Pernambuco
TAQ	Taxa de Aplicação dos Agrotóxicos
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
WWWAP	Programa Mundial de Avaliação da Água

LISTA DE SÍMBOLOS

K_c	Coeficiente da cultura
α	Fração de Lixiviação/Escoamento
β	Fator de Conversão
Δ	Declinação da Curva de Saturação de Vapor da Água
γ	Fator Psicrométrico
T	Temperatura média
e_s	Pressão da Saturação de Vapor
e_a	Pressão Real de Vapor
G	Fluxo de Calor no Solo
u₂	Velocidade do Vento a 2 metros de altura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Caracterização do problema de estudo	20
1.2 Hipótese	21
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo geral	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Bacias hidrográficas como unidade de planejamento	22
2.2 Cultivo de cana-de-açúcar	23
2.2.1 Cultivo de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco	26
2.2.2 Consumo hídrico da cana-de-açúcar.....	27
2.2.3 Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar	28
2.3 Sustentabilidade Ambiental	29
2.4 Pegada Hídrica (PH)	31
2.4.1 Tipos de pegadas hídricas.....	34
2.4.2 Avaliação da Pegada Hídrica.....	37
2.4.3 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica.	39
2.5 ISO 14046	41
2.6 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	42
2.7 Água Virtual	43
2.8 Agrotóxicos	46
3 MATERIAL E MÉTODO	49
3.1 Características da área de estudo	49
3.2 Análise dos dados	53
3.3 Fase I: Definição de objetivos e escopo	54
3.4 Fase II: Contabilização da pegada hídrica	56
3.4.1 Pegada hídrica verde e azul da cana-de-açúcar	56
3.4.2 Pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar	58
3.4.3 Pegada hídrica no processo de fabricação do etanol e açúcar	60
3.4.4 Pegada hídrica dos produtos etanol e açúcar	62
3.5 Mapeamento do uso e ocupação do solo	63

3.6 Fase III: Avaliação da sustentabilidade ambiental da pegada hídrica na sub-bacia.....	64
3.6.1 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica verde dentro da sub-bacia hidrográfica.....	66
3.6.2 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica azul dentro da sub-bacia hidrográfica.....	66
3.6.3 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica cinza dentro da sub-bacia hidrográfica.....	68
3.7 Fase IV: Formulação de respostas para redução da pegada hídrica.....	68
3.8 Análise dos poluentes	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 PH verde, azul e cinza da cana-de-açúcar.....	71
4.2 PH do processo de fabricação dos subprodutos etanol e açúcar.....	83
4.3 Pegada hídrica total dos produtos etanol e açúcar.....	84
4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo	87
4.5 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica da agroindústria canavieira na sub-bacia.....	88
4.5.1 Sustentabilidade para os períodos seco e chuvoso	88
4.5.2 Sustentabilidade para o período mensal	91
4.5.3 Sustentabilidade para o período de safra completa	94
4.6 Formulação de respostas para redução da pegada hídrica	95
4.7 Análise dos poluentes	98
5 CONCLUSÃO	102
6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	104
APÊNDICE A.....	118
APÊNDICE B.....	122
APÊNDICE C.....	125

1 INTRODUÇÃO

O atual modelo de desenvolvimento econômico, caracterizado pela exploração dos recursos naturais, causa danos ao meio ambiente, provoca conflitos socioeconômicos e a indisponibilidade dos mesmos. A exploração desses recursos, sobretudo os hídricos, é potencializada por processos como a industrialização, urbanização e crescimento populacional. Como consequência desse consumo acentuado, a água, mesmo ocupando dois terço da superfície da Terra, cada vez mais está reduzindo sua qualidade e disponibilidade, provocando, assim, disputas e discussões internacionais acerca de sua gestão e usos múltiplos (GIACOMIN; JUNIOR OHNUMA, 2012).

O aumento do uso e poluição da água em grande parte está relacionado com a produção de produtos agrícolas. Hoekstra e Chapagain (2008) indicaram que aproximadamente 86% de toda a água usada no mundo é para a agricultura. Logo, as escolhas dos alimentos terão impactos significativos sobre a demanda de água, uma vez que a necessidade hídrica de cada produto é diferente (STEINFELD et al., 2006; DE FRAITURE et al., 2007; PEDEN et al., 2007; GALLOWAY et al., 2007). Ainda na agricultura, Hoekstra e Chapagain (2007a, 2008) afirmam que a disponibilidade de água doce é comprometida totalmente diante do uso de pesticidas. Além da agricultura, grande volume de água é consumida e poluída também por setores industriais e domésticos, tais como higiene pessoal, refrigeração e processamento (WWWAP, 2009; HOEKSTRA et al., 2011).

No Brasil, o setor agrícola tem se destacado com o cultivo da cana-de-açúcar, considerada uma cultura de grande importância socioeconômica, posicionando o país como o maior produtor mundial (CONAB, 2016). Os principais produtos derivados são o açúcar e o etanol, como também a aguardente, bagaço, vinhaça, plástico e papel (SILVA et al., 2015) e a cogeração de energia. De acordo com Doorenbos e Kassam (1994) o consumo de água para essa cultura é de 1500mm a 2500mm distribuídos durante todo o processo de desenvolvimento da planta. Portanto, diante da relevância para o Brasil e da grande quantidade de água consumida, é necessário o conhecimento detalhado de todo o processo hídrico envolvido no crescimento dessa cultura e na elaboração dos seus subprodutos.

Os conflitos pelos usos múltiplos da água sejam por motivação agrícola ou outros, são cada vez mais frequentes. A água doce em quantidade e qualidade suficiente é considerada um pré-requisito para a sobrevivência do homem e todo o ecossistema (COSTANZA; DALY, 1992). Portanto, em virtude da necessidade de atender aos diversos usos e garantir a

quantidade e qualidade da água, debatem-se modelos de gestão de recursos hídricos, passíveis de minimizar a indisponibilidade de água doce no mundo (HOKESTRA; CHAPAGAIN, 2007 b; MARACAJÁ et al., 2012; BLENINGER; KOTSUKA, 2015).

A avaliação da gestão das águas é possível através do desenvolvimento de indicadores que caracterizam e monitoram a situação dos recursos hídricos pelo mundo, expondo o descompasso entre a disponibilidade e a demanda hídrica. Um desses indicadores é a pegada hídrica (PH), conceito introduzido em 2002 por Arjen Hoekstra (HOKESTRA, 2003a). A PH é um indicador de consumo dos recursos hídricos que permite mensurar os volumes de água utilizados para fabricação dos produtos e serviços, consumidos por um indivíduo, empresa ou comunidade (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2008; HOKESTRA et al. 2011).

Considerado um indicador multidimensional, a PH apresenta em seus cálculos os volumes das diversas fontes, como água subterrânea, superficial e chuva, além do volume de água poluído durante o processo produtivo, especificando o local e o tempo (ERCIN et al 2011; HOKESTRA et al. 2011; ERCIN et al., 2012; SOUSA JUNIOR; VIEIRA, 2012). O cálculo da PH de um produto corresponde ao volume de água utilizado de forma direta ou indireta no decorrer do processo de fabricação, já em uma zona delimitada, como uma nação ou bacia hidrográfica, a PH é igual a soma das pegadas de todos os processos que ocorrem nessa área (HOEKSTRA et al., 2011).

Na avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica compara-se a PH humana com a que o planeta resiste de modo sustentável (HOEKSTRA et al., 2011). Por exemplo, em determinada região a PH será insustentável caso as demandas de vazões ambientais ou os padrões de qualidade de água estiverem prejudicados, ou ainda quando a destinação do recurso hídrico dentro de uma bacia for considerada desigual ou ineficiente (ÁGUA BRASIL, 2014). A sustentabilidade de uma pegada hídrica depende de fatores climáticos e hídricos de uma região, observa-se que em locais com fluxo de água elevado tem uma PH diferente daqueles com escassez de água (MARACAJÁ et al., 2012).

A quantificação da PH é uma ferramenta de grande utilidade para a gestão dos recursos hídricos de um país, para uma região geográfica, para um consumidor ou setores produtivos. No Brasil, as primeiras utilizações desse conceito como indicador de uso de água, surgiram entre 2010 e 2011, com aplicações no setor pecuário e industrial (MARTINS, 2014). Apesar de sua importância, UNEP (2011); Zeng et al. (2012); Empinotti (2013); Freitas e Chaves (2014) afirmam que os trabalhos referentes à PH são raros, principalmente no tocante a bacia hidrográfica.

Diante do exposto, justifica-se a necessidade de pesquisas que utilizam a PH como indicador para análise da sustentabilidade ambiental, sobretudo, em áreas que se destacam com atividades agrícolas, as quais possuem grande potencial de impacto ao meio ambiente. No Brasil ressalta o cultivo de cana-de-açúcar dentre as atividades agrícolas com grande relevância econômica ao país, e com extensa área de plantação, portanto, a análise da sustentabilidade ambiental da agroindústria canavieira para o país contribui para seu desenvolvimento mais sustentável. Em áreas de expansão agrícola é fundamental conhecer a sustentabilidade ambiental da PH, devido ao consumo em excesso de água e utilização de agrotóxicos que comprometem a qualidade dos recursos hídricos.

1.1 Caracterização do problema de estudo

A sub-bacia do rio Capibaribe Mirim, localizada maiormente na Microrregião da Mata Setentrional Pernambucana, é uma das principais da bacia do rio Goiana e abrange mais de 50% da área desta. Com mais de 90 km de extensão, o Capibaribe Mirim atravessa por cidades como: São Vicente Férrer, Macaparana, Timbaúba e Goiana, que consomem, direta ou indiretamente, a água para as mais diversas finalidades.

Dentre as atividades predominante nesta sub-bacia, destaca-se o cultivo da cana-de-açúcar, e na área localizam-se cerca de sete usinas (Aliança; Barra; Nossa Senhora de Lourdes; Laranjeira; Cruangi; Olho D'Água e Nossa Senhora das Maravilhas), as três primeiras encontram-se desativadas (CPRH, 2003). A agroindústria canavieira demanda de água para a irrigação, ao mesmo tempo que lança poluentes para a rede hidrográfica, aos quais se acrescem com os poluentes de origem industrial, doméstico e de outros cultivos agrícolas no rio Capibaribe Mirim.

O intenso uso de poluentes neste rio, como os agrotóxicos da agroindústria canavieira, pode gerar impactos ambientais e a degradação da qualidade dos recursos hídricos. Essas substâncias perpassam por processo de dispersão, que pode alterar a qualidade da água superficial e/ou subterrânea. Este processo contribui significativamente no valor final da pegada hídrica, consequentemente a possibilidade da agroindústria canavieira ser uma atividade insustentável do ponto de vista ambiental.

1.2 Hipótese

A presente tese partiu da premissa que a aplicabilidade do indicador de pegada hídrica pode servir de base para a análise da sustentabilidade ambiental, na agroindústria canavieira localizada na sub-bacia Capibaribe Mirim em Pernambuco. Contribuindo, assim, para a gestão dos recursos hídricos, visto que, a expansão agrícola promove o consumo da água e a utilização de agrotóxicos, alterando qualidade e quantidade deste recurso natural.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a pegada hídrica como indicador de sustentabilidade ambiental, da agroindústria canavieira no município de Camutanga – PE, inserida na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Calcular a pegada hídrica da agroindústria canavieira: as componentes verde, azul e cinza do cultivo de cana-de-açúcar e da componente azul no processo de fabricação dos subprodutos, etanol e açúcar, dentro da área específica;
2. Contabilizar a pegada hídrica dos subprodutos, etanol e açúcar;
3. Mapear o uso do solo da área estudada;
4. Determinar a sustentabilidade ambiental da pegada hídrica verde, azul e cinza, para a agroindústria canavieira na sub-bacia, considerando com os períodos seco, chuvoso, mensal e safra completa, correspondente as safras de 2016/2017, 2017/2018 e da série histórica de 2000 a 2017;
5. Propor medidas para redução da pegada hídrica;
6. Analisar os agrotóxicos no cultivo de cana-de-açúcar, objetivando caracterizar seu nível de poluição da água, toxicidade e periculosidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bacias hidrográficas como unidade de planejamento

A bacia hidrográfica é uma área delimitada por um divisor de águas, que capta a precipitação convergindo o escoamento gerado em seu interior para um único ponto de saída, o exutório ou foz. A mesma é constituída por um conjunto de superfícies, vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água os quais afluem até tornar um único leito no exutório. Na bacia hidrográfica são realizados os balanços de entrada, originada da chuva, e saída de água, o que permite o delineamento das bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos (PORTO; PORTO, 2008).

Nas avaliações hidrológicas e ambientais o primeiro procedimento a ser adotado é a delimitação da bacia, por ser considerada a área de planejamento e gestão dos recursos hídricos. Musetti (2000) apresenta que a bacia deve ser compreendida como unidade ecossistêmica e morfológica que promove a avaliação dos problemas ambientais, assim como é a unidade adequada para o planejamento e manejo, aprimorando a utilização dos recursos humanos e natural.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) instituída pela Lei Federal N° 9.433/97, incorpora fundamentos e instrumentos para a gestão dos recursos hídricos adotando como unidade territorial, a bacia hidrográfica para implementação e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, sendo os planos elaborados por bacias, por Estado e País, portanto, é essencial que pesquisadores e gestores compreendam a conceituação de bacia hidrográfica.

Diversos conceitos de bacia hidrográfica foram abordados ao longo do tempo. Yassuda (1993), por exemplo, define como o local de interações das águas com meio físico, biótico, social, econômico e cultural. Assunção (2013) conceitua como área topográfica, drenada por um ou vários cursos d'água a qual toda vazão efluente é descarregada em uma única saída. Além da definição, é primordial também a compreensão da sua demarcação. Sperling (2007) determina a demarcação da bacia seguindo as seguintes etapas: definição do exutório; diferenciar talvegues dos divisores de água; demarcação do rio principal e tributário; por fim a delimitação que se deve iniciar pelo exutório e ligando os pontos de maior altitude, seguindo as curvas de nível, até chegar novamente no exutório.

Outros conceitos referente à bacia hidrográfica são sub-bacia e microbacia. O termo sub-bacia pode ser definido como áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal das bacias hidrográficas, que segundo Faustino (1996) são áreas entre 100 a 700 km². Embrapa (2003) e Teodoro et al. (2007), afirmam que cada bacia interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia, sendo relativos os termos de bacia e sub-bacia. Faustino (1996), apresenta o conceito de microbacia como uma área com drenagem direta ao curso principal da sub-bacia e que várias microbacias (inferior a 100 km² de área) formam uma sub-bacia.

Diante do tamanho das bacias, os trabalhos de manejo dessas, devem ser iniciados preferencialmente, nas de menores porte ou sub-bacias. Politano e Pissarra (2003) ressaltam que as bacias hidrográficas são áreas ideais para avaliar os impactos causados pelas atividades antrópicas, portanto a sua subdivisão em unidades menores permite minudenciar os impactos difusos, facilitando a identificação de pontos de deterioração dos recursos naturais.

A compreensão e avaliação de uma bacia hidrográfica colaboram mais satisfatoriamente para uma gestão da água adequada no local, promovendo a potencialização e preservação do recurso hídrico. Outrossim, a aplicação da legislação de forma mais apropriada possui vários interesses de cunho sociais, econômicos e ambientais.

No Brasil, as bacias hidrográficas estão divididas de acordo com a resolução N° 32, de 15 de outubro de 2003 e são agrupadas de acordo com as características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, para assim orientar o planejamento e gerenciamento das águas. O Estado de Pernambuco apresenta 29 unidades de planejamento hídrico, sendo 13 correspondente a bacia hidrográficas importantes, como a bacia de Goiana, 6 grupos de bacias de rios litorâneos, 9 de pequenos rios interiores e 1 de pequenos rios que compõe a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha (SECTMA -PE, 1998).

A bacia do rio Goiana, situada preponderantemente no estado de Pernambuco, é formada por três sub-bacias a se apresentarem como sub-bacia do rio Capibaribe Mirim, Tracunhaém e a da Goiana *stricto sensu*, formada pela junção das duas primeiras

2.2 Cultivo de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) é uma monocotiledônea pertencente à família *Poaceae*, e ao gênero *Saccharum*. Nativa da Ásia, desenvolve-se satisfatoriamente em

latitudes próximos a 35°Norte e Sul do Equador, e em altitudes até 1000 metros do nível do mar (MAGALHÃES, 1987; DOORENBOS; KASSAN, 1994).

De acordo com Silva (2014) a cana-de-açúcar foi propagada no sul da Europa e norte da África, pelos árabes. Sendo essa uma planta típica de regiões tropicais, a cultura não se adaptou as condições climáticas da Europa. Em seguida, a mesma foi cultivada nas ilhas de Madeira e das Canárias. Na América, o desenvolvimento da cana ocorreu por volta do século XVI, adaptando-se as condições locais. Hoje a produção mundial de cana-de-açúcar é aproximadamente 1,5 bilhões de toneladas por ano, localizada principalmente na faixa tropical do planeta (SILVA et al. 2015).

No Brasil, a cana-de-açúcar foi difundida em 1532, com a expedição de Martim Afonso de Souza. Inicialmente, entre o século XVI e XIX, a maior produção era na região da Zona da Mata nordestina, de forma rudimentar e com mão de obra escrava, depois sendo expandida para a região Sudoeste, com destaque em São Paulo. Após 1870, com o movimento abolicionista juntamente com o favorecimento das exportações, os senhores de engenho foram forçados a modernizar o processo. Em 1890, portanto, surgiram os engenhos centrais que são os complexos canavieiros, ou seja, as atuais usinas (MAPA, 2007; CONAB 2013).

Atualmente, a cana-de-açúcar se transformou em uma das principais culturas da economia brasileira. De acordo com o segundo levantamento realizado pela CONAB em 2018, a estimativa da produção do Brasil para 2018/2019 é de 635,51 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, em uma área de aproximadamente 8,66 milhões de hectares, o que representa uma produtividade de 73373 kg/ha. A região com maior produção é o Sudeste com 64,9% da produção brasileira, seguida do Centro- Oeste (21,77%), Nordeste (7,03%), Sul (5,77%) e Norte (0,53%). Quanto aos principais produtos processados, o açúcar está com sua produção estimada, para safra 2018/19, em 34245,9 mil toneladas, e o etanol com expectativa de produção de 30,41 bilhões de litros

O setor sucroalcooleiro no Brasil é referência para os demais países produtores. Segundo a CONAB (2013) existem três pontos fundamentais que diferenciam a produção brasileira de outros locais. O primeiro ponto é que a maior parte das indústrias brasileiras produz uma maior quantidade de cana-de-açúcar do que processa, pouco mais de 36% da matéria prima processada é derivada de terceiros, enquanto no âmbito internacional a produção de cana-de-açúcar é separada da produção industrial. O segundo ponto, diz respeito a diversidade de produtos, além do açúcar e etanol, que são fabricados a partir do caldo e dos

resíduos sólidos e líquidos da moagem, pode-se listar também a rapadura, cachaça, cogeração de energia elétrica e entre outros. O terceiro ponto ressalta a organização desse setor quanto à distribuição espacial, ou seja, quase todo o território produz cana-de-açúcar, o que possibilita variedades de cana serem cultivadas em diferentes períodos, facilitando, assim, a logística e manutenção da fabricação do açúcar e etanol, com diferentes intensidades, durante todos os meses do ano.

De acordo com a agência Embrapa de informação e tecnologia - AGEITC (2016) as variedades cultivadas de cana-de-açúcar em sua maior parte são híbridas, representando no Brasil 60% desse cultivo. Com o avanço tecnológico houve um grande melhoramento genético de variedades de cana-de-açúcar, tornando-as mais adaptadas as condições edafoclimáticas de cada região, além de mais resistentes a pragas e mais produtivas (SILVA et al., 2011). A AGEITEC (2016) afirma que a produtividade média dos canaviais aumentou de 43 toneladas por hectare em 1961 para 74 toneladas por hectare em 2005, e isso foi resultado provável do melhoramento genético das variedades utilizadas.

Ainda segundo AGEITEC (2016), as tantas variedades existentes é uma vantagem, por exemplo, para evitar riscos com proliferação de pragas dentro do canavial. Embora, para tomar a decisão de qual variedade será mais adequada para determinada região, requer mais conhecimento e ciência acerca das opções, exigindo maior atenção ao selecioná-la.

O melhoramento genético da cana-de-açúcar contribui para o aumento da sua produtividade, selecionando-se variedades que se adaptam melhor as condições climáticas, de solo e pragas do local. No Brasil as principais variedades utilizadas são as RBs (República Federativa do Brasil), da Ridesa (Rede Interuniversitária de desenvolvimento do setor Sucroalcooleiro); as SPs (Copersucar, São Paulo) e CTC (Centro de Tecnologia Canavieira) distribuídas pela Copersucar (cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo); e as variedades IAC e IACSP (Instituto Agrônomo de Campinas - São Paulo), desenvolvidas pelo próprio Instituto. As siglas se referem a instituição que desenvolveu a variedade, seguido de dois números que significam o ano de cruzamento, e os demais números correspondem ao clone daquele ano.

O cultivo da cana-de-açúcar é realizado através de toletes contendo uma ou mais gemas. As gemas ao entrar em contato com as condições favoráveis, como a disponibilidade hídrica no solo, seu crescimento é ativado. Logo após o plantio segue-se os quatro estágios fenológicos da cana-de-açúcar, brotação, perfilhamento, crescimento e maturação dos colmos. Na primeira fase a brotação e emergência, o broto se rompe e as folhas na gema começam a se

desenvolver, sucessivamente surgem às raízes dos toletes, sendo o início da emergência do broto de 20 a 30 dias após o plantio. Em seguida, esse broto, que surge acima do solo é denominado de colmo, e a emissão dos colmos é a fase de perfilhamento, cada perfilho é caracterizado como planta independente com suas raízes, órgão e folhas próprias (SILVA, 2014).

A cana-de-açúcar é cultivada principalmente como monocultura. O primeiro plantio de mudas de cana é denominado de culturas cana-planta ou planta cultura, após a primeira colheita dos colmos, uma soca é regenerada a partir dos restolhos de planta, originando a cana-soca. Dependendo do solo e do manejo, pode-se obter de três a sete culturas socas de apenas uma cana-planta, ou seja, uma cana-planta permite de 3 a 7 cortes. A colheita pode ser feita pela queima ou a cana verde, retirando-a com mão ou máquinas, sendo o início da colheita entre 9 a 12 meses normalmente, porém pode ser até mais dependendo da precipitação do local. Após um ciclo de cana-planta deve plantar culturas de pousio, antes de um novo ciclo de plantio de cana-planta (FAO, 2012).

Segundo a Agência Nacional das águas - ANA (2009), na região canavieira Centro-Sul do Brasil, principalmente, em São Paulo, as canas estão divididas em 3 blocos: cana de ano e meio, cujo crescimento é de 15 a 18 meses, com boa produtividade e plantada de fevereiro a maio; cana de inverno, plantada entre final de maio a agosto/setembro tendo um período de 12 a 14 meses; e por fim cana ano plantada de setembro a novembro, no início das precipitações de primavera, sendo sua colheita do meio para o fim da safra. Ainda no Brasil, o ciclo da cana-de-açúcar é de 12 a 18 meses e na região Nordeste é de 12 a 14 meses (SCARDUA; ROSENFELD, 1987).

2.2.1 Cultivo de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco

O Estado de Pernambuco, até aproximadamente século XX, foi o principal produtor nacional de cana-de-açúcar. Os principais concorrentes da época eram a Bahia e o Rio de Janeiro, logo depois, no final do mesmo século, São Paulo e outros estados foram superando a produção pernambucana. Uma das principais causas para a queda foram os períodos de seca e a dificuldade de concorrer com os custos de produção do Centro-Sul, principalmente, devido a extinção do instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) e políticas de subsídios (ANDRADE, 2001). Hoje, de acordo com Simões Neto et al. (2012), a agroindústria da cana-de-açúcar, no

Estado de Pernambuco, possui uma ampla área agrícola com destaque na produção de açúcar e etanol, e conseqüentemente na geração de empregos diretos tanto em áreas rurais como industriais, proporcionando uma grande contribuição social.

De acordo com o segundo levantamento da CONAB (2016), o estado de Pernambuco possui 17 unidades sucroalcoleiras em operação, estando situadas principalmente na zona da mata e no litoral. O relevo apresenta-se de ondulado (8 a 20% de declividade) a fortemente ondulado (20 a 45% de declividade), inviabilizando a prática mecanizada da colheita.

A produção estimada para a safra de 2018/2019 é de 11,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em uma área de 231 mil hectares. Ainda na mesma safra, entre os estados do Brasil, Pernambuco ocupa a oitava posição em produção da cana-de-açúcar, e o segundo estado produtor no Nordeste, perdendo apenas para Alagoas. A produção, resultará em 754,8 mil toneladas de açúcar, o que representa 6291,2 toneladas de cana-de-açúcar destinada ao produto açúcar; e 406,4 milhões litros de etanol, correspondendo 5537,4 mil toneladas de cana-de-açúcar, para safra 2018/2019 (CONAB 2018).

2.2.2 Consumo hídrico da cana-de-açúcar

Quantificar as reais necessidades hídricas da cana-de-açúcar possibilita manejar adequadamente o sistema de irrigação e o manejo da água. Alguns métodos são empregados para determinar ou estimar o consumo hídrico, como o balanço hídrico climatológico, lisímetros, tanques classe A, monitoramento do clima e solo, sensoriamento remoto e outros.

Na cana-de-açúcar, o consumo hídrico, varia de acordo com o ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), do seu estágio fenológico, do tipo da cultivar, de condições climáticas e água disponível no solo variedade, manejo de irrigação, tipo do solo, idade de corte e quantidade de fertilizantes (THORBURN et al., 2003; SANTOS, 2005; SMIT;SINGELS, 2006). A demanda hídrica da cana-de-açúcar para que alcance bons níveis de produtividade varia de 1500 a 2500mm (OMETTO, 1980; DOORENBOS;KASSAM, 1994), sendo a distribuição uniforme durante todo período vegetativo. Scardua e Rosenfeld (1987) apresentaram de acordo com a Tabela 1, um resumo do consumo médio de água em algumas regiões e em diferentes ciclos da cultura.

Tabela 1: Consumo da água pela cana-de-açúcar, obtido pelo método de campo por diversos autores.

Autor	Ano	Local	Ciclo da cultura	Consumo de água (mm.dia ⁻¹)		
				Mínimo	Médio	Máximo
Média				2,1	3,5	4,9
Cox	1960	Havai		3,8		8
Thompson	1963	África do Sul		2,2		6
Tosello	1966	Brasil		1,3		3,4
Cruciani	1972	Brasil		1,2		2,8
Souza	1974	Brasil	Planta	2,3	3,6	4,5
Souza	1975	Brasil	Soca	2,2	3,6	5
Leme	1978	Brasil	Planta	1,9	3,8	5,6
Leme	1978	Brasil	Planta	1,3	3,2	4,8
Scardua	1979	Brasil	Planta	2,3	3,3	4,5
Scardua	1979	Brasil	Soca	2,2	3,2	4,4

Fonte: Scardua e Rosenfeld (1987)

Silva et al. (2015), apresentaram que para a cana-de-açúcar cultivada em clima tropical, no estado da Alagoas, para uma determinada variedade (RB 92579), o consumo médio foi de 5,53 mm/dia, na fase de crescimento máximo, em cana irrigada com 100% de evapotranspiração.

2.2.3 Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar

O coeficiente da cultura (K_c) influenciará na evapotranspiração, sendo determinado pela razão da evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração potencial (ETP). Doorenbos e Pruitt (1977); Doorenbos e Kassan (1979) determinaram o coeficiente da cultura para diferentes estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente da cultura (K_c) para diferentes estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar

Idade da cultura (meses)		Estádio de desenvolvimento	Coeficiente (K_c)		
Cana planta	Cana soca		Mínimo	Médio	Máximo
0-2	0-1	Do plantio até 0,25 de cobertura	0,40	0,50	0,60
2-3	1-2	De 0,25 a 0,50 de cobertura	0,75	0,80	0,85
3-4	2-3	De 0,50 a 0,75 de cobertura	0,90	0,95	1,00
4-7	3-4	De 0,75 a cobertura completa	1,00	1,10	1,20
7-14	4-9	Utilização máxima	1,05	1,20	1,30
14-16	9-10	Início da maturação	0,8	0,95	1,05
16-18	10-12	Maturação	0,60	0,70	0,75

Fonte: FAO (1977, 1979)

Outros autores também determinaram o coeficiente de cultura da cana-de-açúcar para determinadas regiões. Barbieri (1981) em pesquisa com cana-de-açúcar determinou o coeficiente de cultura nas condições de Araras – SP, selecionando três métodos na estimativa da evapotranspiração de referência (Tabela 3)

Tabela 3: Valores de K_c para cana-planta

Idade da cana-planta (meses)	Coeficiente da cultura (K_c)		
	Penman	Radiação	Tanque classe "A"
0 - 2	0,10 - 0,20	0,10 - 0,20	0,12 - 0,25
2 - 3	0,20 - 0,40	0,20 - 0,40	0,25 - 0,53
3 - 4	0,40 - 0,60	0,40 - 0,55	0,53 - 0,75
4 - 7	0,60 - 1,5	0,55 - 0,96	0,75 - 1,47
7 - 17	1,5 - 0,96	0,96 - 0,77	1,47 - 0,87

Fonte: Barbieri (1981)

Silva et al. (2014) afirmam que uma irrigação planejada, com o conhecimento do K_c , refletirá na qualidade do produto, no seu rendimento e na economia da produção, uma vez que o excesso de água poderá provocar a salinização do solo e contaminação do lençol freático. Portanto, os autores, indicaram para o cultivo de cana-de-açúcar, em região de clima tropical, o K_c de 0,56 ; 0,65; 1,43 e 1,32, para os estádios inicial, desenvolvimento, média e final, respectivamente.

2.3 Sustentabilidade Ambiental

O crescimento da população mundial e conseqüentemente a degradação do meio ambiente é uma realidade que a humanidade nos últimos anos vivencia, exigindo uma reflexão urgente do equilíbrio e impactos da sociedade sob o meio ambiente (MARACAJÁ et al. 2013, 2014). O homem sempre foi dependente dos recursos naturais para a sua sobrevivência e os impactos negativos da exploração sobre o meio ambiente são praticados ao longo da história, entretanto, alguns processos como a industrialização, urbanização e crescimento populacional, intensificaram a ação predatória e os danos ambientais. As discussões acerca dos efeitos da poluição e outros problemas socioambientais, só foram de fato iniciadas pelos cientistas a partir da industrialização. A Revolução Industrial no século XVIII foi o grande marco na história da humanidade, que além das transformações

socioeconômicas, intensificou-se os problemas ambientais devido a extração dos recursos (CURI, 2011), configurando um novo modelo de desenvolvimento econômico, e a partir deste momento que se obteve resultados mais concretos e significativos das consequências do uso exploratório e inadequado dos recursos naturais.

A evidência da degradação ambiental pela utilização irregular dos recursos naturais, como fator indispensável para o desenvolvimento econômico, impressionou especialistas que buscaram realizar reuniões e eventos a nível global para a discussão de responsabilidades e medidas de conservação do meio ambiente. Em 1923, Paris sediou o primeiro Congresso Internacional para a Proteção da Natureza, mesmo com poucos resultados e relevância, ele foi precursor para outros movimentos. Em 1972 na cidade de Estocolmo, Suécia, realizou-se a primeira conferência internacional sobre meio ambiente, com representações diplomáticas de 113 países, caracterizado pela ruptura das visões tradicionais de meio ambiente, abordando aspectos políticos e econômicos e as consequências desses sobre a natureza. A conferência aprovou o documento conhecido como a Declaração sobre Meio Ambiente Humano, constituído por 26 princípios e 110 recomendações, além da criação do Programa das Nações Unidas sobre Meio Ambiente (PNUMA), com o intuito de monitorar os problemas ambientais mundialmente (CURI, 2011; BARSANO; BARBOSA, 2013).

Em 1987 a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, estabelecida pela Organização das Nações Unidas, elaborou um importante documento para a temática ambiental, conhecido como o Relatório Nosso Futuro ou Relatório de Brundtland, o qual definiu o termo de desenvolvimento sustentável. Sob a liderança da primeira ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, o relatório teve como objetivo harmonizar a tríplice relação de economia, sociedade e meio ambiente, definindo sustentabilidade como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a das futuras gerações (SICHE et al., 2007; CURI, 2011; BARSANO; BARBOSA, 2013; SOUZA; RIBEIRO, 2013).

A avaliação da sustentabilidade é realizada através de uso de indicadores, os quais teve-se a ideia de desenvolve-los, durante a Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente - Rio 92, na qual resultou o documento conhecido como Agenda 21 e conforme seu capítulo 40, os indicadores existentes com o produto nacional bruto ou medições de contaminação individuais, não representava a sustentabilidade, sendo, portanto, primordial a elaboração de novos indicadores.

Os indicadores de sustentabilidade ambiental são ferramentas que auxiliam na gestão dos recursos naturais. Estes representam os efeitos da intervenção do homem exercida sobre o

meio ambiente, identificando os danos nos ecossistemas e na vida humana. De acordo com o Ministério de Meio Ambiente (MMA, 2014), os indicadores permitem simplificar as informações sobre o aspecto do estado do meio ambiente, ilustrando a realidade e os fenômenos ocorridos, sendo reduzidos o tempo e recursos financeiros utilizados na recuperação e manutenção do local.

Atualmente, existem diversos indicadores para avaliarem as condições do meio ambiente e o equilíbrio entre as sustentabilidades socioeconômicas e ambientais. Nesse contexto, destacam-se os indicadores de pegadas ecológica (PE), de carbono (PC) e hídrica (PH), que constituem a família das pegadas, os quais permitem analisar os impactos das atividades humanas sobre o meio ambiente.

A pegada ecológica é um dos indicadores mais difundidos e utilizados a nível global, introduzido no início da década de 90 e elaborado por Rees e Wackernagel. Seu objetivo principal é avaliar a pressão do consumo das populações humanas sobre os recursos naturais, através da área de terra necessária para produção e manutenção de bens e serviços consumidos, expressa em uso do espaço (hectares), ou seja, a terra biologicamente produtiva essencial na produção dos recursos renováveis (WACKERNAGEL; REES, 1996; MARACAJÁ, 2016).

A pegada de carbono é um indicador das consequências das ações humanas sobre o meio ambiente e em especialmente nas mudanças climáticas, que consiste na medida das emissões de gases que provocam o efeito estufa (GGE) gerados, em toneladas de carbono, por atividades do ser humano e ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço (MARACAJÁ, 2016; GONÇALVES et al. 2018). Por fim, e mais recente entre a família das pegadas, encontra-se a PH que mede o uso da água de um produto ou serviço, relevante na gestão e tomadas de decisões das águas. Apesar dos métodos de medição para as pegadas serem diferentes, alguns aspectos desses conceitos têm em comum, como por exemplo o uso dos recursos naturais pela humanidade ou o estresse ambiental causado por ela (HOEKSTRA, 2009; HOEKSTRA et al. 2011).

2.4 Pegada Hídrica (PH)

A pegada hídrica é um indicador baseado no consumo da utilização da água, e é definida como o volume total de água que é usado para produzir os bens e serviços consumidos por um indivíduo ou comunidade (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2008;

HOEKSTRA et al., 2009; HOEKSTRA et al., 2011). Para Bleninger e Kotsuka (2015), a PH é um indicador para identificar o impacto do consumo humano em recursos globais de água doce. Ela é expressa em volume por ano, e inclui o consumo, os diferentes usos e a poluição de água doce, para a produção de bens e serviços em uma certa região geográfica (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2007a).

O conceito de PH foi introduzido em 2002, por Arjen Hoekstra, em uma conferência de peritos internacionais que abordavam o comércio de água virtual, realizada em Delft, Holanda. Posteriormente, Hoekstra e Huang em 2002 avaliaram quantitativamente a PH das nações, e de forma mais abrangente por Hoekstra e Chapagain em 2007. O termo determinado por Hoekstra foi uma correlação da pegada ecológica, apesar de terem outros princípios, uma vez que a ecológica é expressa em hectares, e a PH por volume de água doce utilizada (SILVA et al., 2013).

Após a introdução do conceito de pegada hídrica por Hokestra, aumentou-se o interesse por discussões quanto ao uso da água ao longo de toda a cadeia produtiva (HOEKSTRA, 2003a). O conceito de PH foi discutido principalmente em reuniões que diz respeito aos recursos hídricos e ciência política, tal como o Fórum da Água no Japão em 2003 e na conferência sobre água virtual também no mesmo ano (SILVA et al., 2013).

Para Hoekstra et al. (2009; 2011) o conceito de PH se difere do consumo de água usual, pois considera tanto o uso direto como indireto. Outro motivo é que a PH não considera o consumo de água, se está água retornar ao meio no qual foi retirada. Mais um diferencial desse conceito é considerar a água originada de chuva, umidade do solo e água poluída durante todo o processo.

A Pegada Hídrica tem uma visão mais ampla sobre a relação de consumidor e produtor com seus usos dos sistemas de água doce. É considerada uma medida volumétrica tanto de consumo como poluição da água, e não é uma medida de impacto ambiental local relacionado à água. O impacto ambiental do consumo e poluição da água dependerá da vulnerabilidade do sistema hídrico, assim como a quantidade de consumidores e poluidores que utilizam o sistema. Portanto, a PH fornecerá informações da posse da água em determinado espaço e local, construindo discussões do uso da água, e serve também como instrumento para a avaliação de impactos ambientais, sociais e econômicos (HOEKSTRA et al., 2011).

Pesquisas foram desenvolvidas para estimar o consumo global da água, avaliando-se as pegadas hídricas de países, produtos, bacias e demais setores. Nesse contexto, Mekonnen e Hoekstra (2011) apresentaram que no setor agrícola a PH mundial foi de 7404 Gm³/ano,

correspondendo respectivamente a 78%, 12% e 10% de pegada hídrica verde, azul e cinza. Sendo a cultura do trigo, entre as 146 estudadas, a que mais contribui para esses números com 15% do total, seguida de arroz (13%); milho (10%); culturas forrageiras (9%); soja (5%); cana-de-açúcar (4%); algodão em caroço (3%); cevada (3%); sorgo (2%); óleo de palma (2%); coco (2%); painço (2%); café verde (2%) e outros (28%).

Ainda segundo a pesquisa de Mekonnen e Hoekstra (2011), entre os países o que apresentou maior pegada hídrica foi a Índia com 1047 Gm³/ano, sendo o Brasil o quarto colocado com 329 Gm³/ano (Tabela 4). Quanto ao nível de bacia hidrográfica, Mississippi, Ganges, Yangtze, Indus e Paraná, estas cinco bacias hidrográficas, juntas, respondem por 23% da pegada de água global, relacionados com a produção de culturas (Tabela 5).

Tabela 4: Pegada Hídrica da produção agrícola em alguns países

País	Pegada Hídrica da produção agrícola (m ³ /ano)			
	Verde	Azul	Cinza	Total
Índia	7,16x10 ¹¹	2,31x10 ¹¹	9,94x10 ¹⁰	1047x10 ¹¹
China	6,24x10 ¹¹	1,19x10 ¹¹	2,24x10 ¹¹	967x10 ¹¹
USA	6,12x10 ¹¹	9,59x10 ¹¹	1,18x10 ¹¹	826x10 ¹¹
Brasil	3,04x10 ¹¹	8,90x10 ⁹	1,60x10 ¹⁰	329x10 ¹¹
Rússia	3,05x10 ¹¹	1,04x10 ¹⁰	1,16x10 ¹⁰	327x10 ¹¹
Indonésia	2,86x10 ¹¹	1,15x10 ¹⁰	2,09x10 ¹⁰	318x10 ¹¹
Nigéria	1,91x10 ¹¹	1,10x10 ⁹	6,00x10 ⁸	192x10 ¹¹
Argentina	1,58x10 ¹¹	4,30x10 ⁹	5,00x10 ⁹	167x10 ¹¹
Canadá	1,20x10 ¹¹	1,60x10 ⁹	1,82x10 ¹⁰	140x10 ¹¹
Paquistão	4,06x10 ¹⁰	7,43x10 ¹⁰	2,18x10 ¹⁰	137x10 ¹¹
Mundo	5771x10 ¹¹	899x10 ¹¹	733x10 ¹¹	7403x10 ¹¹

Fonte: Mekonnen e Hoekstra (2011)

Tabela 5: Pegada Hídrica da produção agrícola em algumas bacias hidrográficas.

Bacia Hidrográfica	Pegada Hídrica da produção agrícola (Gm ³ /ano)			
	Verde	Azul	Cinza	Total
Mississippi	424	40	70	534
Ganges	260	108	39	408
Yangtze (Chang Jiang)	177	18	61	256
Indus	102	117	34	253
Parana	237	3.2	9.4	250
Niger	186	1.7	0.5	188
Nile	131	29	6.9	167
Huang He (Rio amarelo)	80	21	31	132
Nelson	108	1.5	18	128
Danube	106	1.8	11	119
Krishna	89	3.4	3.9	118
Volga	101	3.4	3.9	108
Ob	92	1.8	1.8	95
Mundo	5771	899	733	7404

Fonte: Mekonnen e Hoekstra (2011)

No Brasil, as demandas consultivas de recursos hídricos foram estimadas para 2014 em $2.275\text{m}^3/\text{s}$ de vazão retirada. A maior contribuição foi para o setor agrícola, retirando $1252,73\text{m}^3/\text{s}$, o que corresponde a 55% do uso entre os setores de indústria, animal, consumo humano urbano e rural. O valor consumido efetivamente foi $1209,64\text{m}^3/\text{s}$, para a irrigação foi $912,63\text{m}^3/\text{s}$, representando 75%, dos demais setores (ANA, 2015).

O cálculo da pegada hídrica deve levar em consideração qual o tipo de pegada que se quer calcular. Por exemplo, Hoekstra et al. (2011) apresentam a relação entre diferentes tipos de pegadas, onde a PH de um produto é a soma das pegadas das etapas ocorridas para a produção do mesmo; já a PH de um consumidor é a soma de todas as pegadas dos produtos consumidos por ele; e a pegada de uma área delimitada (país, estado ou bacia hidrográfica) é a soma de todos os processos que ocorrem naquela área. Além de incluir os usos diretos e indiretos a PH fornece o consumo de água superficial e subterrânea, a utilização da água de chuva e poluída (HOEKSTRA et al. 2011).

2.4.1 Tipos de pegadas hídricas

A pegada hídrica total para um indivíduo, comunidade, serviço, empresa, produto ou área delimitada geograficamente é igual a soma das componentes das PHs, que são divididas em três: azul, verde e cinza.

A pegada hídrica azul está relacionada ao consumo de água (superficial e subterrânea) durante todo o processo de um produto e/ou serviço. Sendo o consumo compreendido como a perda da água, tanto superficial como subterrânea, de uma bacia hidrográfica, ou seja, quando a água evapora, retorna para outra bacia, mar ou é incorporado no produto, ou ainda quando a água não retorna no mesmo período (HOEKSTRA et al., 2009; 2011). Ou seja, ela mede a quantidade de água que está de forma disponível para o homem e que é consumida em um período específico, sem que haja seu retorno imediato para a bacia que foi retirada a água.

Na indústria ou no abastecimento humano, a PH azul é representada pelo volume de água extraído das fontes de água doce. Já na agricultura, além desse volume, é contabilizada também a evaporação da água de irrigação dos campos (WICHELNS, 2010; HOEKSTRA et al., 2009).

Em um processo a PH azul é calculada da seguinte forma:

$$PH_{azul} = EVA_{azul} + I_{azul} + Perdas \quad (1)$$

Onde:

PH_{azul} = Pegada Hídrica Azul do Processo [volume/tempo]

EVA_{azul} = Água evaporada

I_{azul} = Água incorporada

Perdas = Perdas no fluxo de retorno

O primeiro componente, a água evaporada, é o mais significativo. Por isso em algumas situações o consumo é equiparado com a evaporação, porém os outros componentes devem ser incluídos quando necessários (HOEKSTRA et al., 2009; 2011).

A produtividade de culturas anuais pode ser baseada no seu ciclo de produção agrícola, sendo a PH_{azul} , para um plantio, determinada pela razão da necessidade/demanda hídrica azul sobre a produtividade da cultura.

Sendo a demanda hídrica calculada com base na evapotranspiração diária acumulada (ET/ mm/dia), durante todo o ciclo completo de desenvolvimento da cultura, portanto desde o primeiro dia do plantio ($d = 1$), até o dia da colheita ($pdc =$ período de desenvolvimento da cultura) (HOEKSTRA et al., 2011).

Alguns modelos são desenvolvidos para calcular a evapotranspiração, como por exemplo, de forma indireta por dados climáticos, solo e cultura. Outro é o CROPWAT 8.0 , desenvolvido por Joss Swennenhuis para a Unidade de Desenvolvimento e Gestão da Água da FAO.

A pegada hídrica verde representa a água proveniente de precipitação, sendo essencial na contabilização dos produtos agrícolas. Segundo Hokestra et al. (2009; 2011) é o volume de chuva que não escoar ou não recarrega a água subterrânea, porém fica armazenada no solo ou temporariamente na superfície e/ou vegetação. Ou seja, é a água que evapora ou é transpirada pela planta, tornando-a produtiva.

Portanto, a PH verde corresponde ao total de água chuva que sofre evapotranspiração mais a água que é incorporada ao produto. Em um processo sua fórmula é representada pela Equação seguinte:

$$PH_{verde} = Evaporação\ de\ água\ verde + Incorporação\ de\ água\ verde \quad [volume/tempo] \quad (2)$$

Na agricultura a PH verde pode ser estimada ou medida por fórmulas empíricas ou por modelos adequados para estimar a evapotranspiração. Sendo a PH verde do processo de crescimento de uma cultura, calculada através da razão do consumo/demanda hídrica verde da cultura sobre a produtividade da cultura.

A distinção entre a PH azul e verde é essencial diante dos impactos hidrológicos, ambientais e sociais. Como também, é importante para diferenciar os custos e o uso da água superficial e subterrânea, dos impactos e dos custos da utilização de água oriunda da chuva (FALKENMARK; ROCKSTRÖN, 2004; HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2008)

A pegada hídrica cinza é um indicador de poluição da água utilizada em certo processo, portanto, é o uso indireto do recurso hídrico. Hoekstra et al. (2009; 2011) definiu como o volume de água essencial para converter a carga de poluentes para as condições naturais (padrões de qualidade de água em seu estado natural) ou para os padrões legais adequados. Seu conceito teve início quando se observou que a poluição hídrica poderia ser expressa em quantidade de volume de água necessário para diluir os poluentes neutralizando seus efeitos, ou seja, sem riscos aos usuários dos recursos hídricos.

A componente cinza da pegada hídrica do desenvolvimento de um processo pode ser expressa pela Equação 3:

$$PH_{cinza} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad [\text{volume/massa}] \quad (3)$$

Em que:

L = carga poluente (em massa/tempo);

Cmax = concentração máxima aceitável (em massa/volume);

Cnat = concentração natural do corpo d'água receptor (em massa/volume);

A carga poluente é compreendida como a carga adicional àquela que já se encontrava no corpo d'água antes da interferência. A concentração máxima é o padrão ambiental de qualidade da água para determinado poluente. A concentração natural é utilizada visto que, a capacidade de assimilação de um corpo hídrico é função da concentração máxima permitida e concentração natural de uma substância. A escolha de não utilizar a concentração real é que esta apresenta a capacidade de assimilação remanescente, ou seja, apresentaria a capacidade para aquele exato momento, variando a todo instante em resposta do nível de poluição. Quando as concentrações naturais não são reconhecidas e estão no nível baixo ou caso não haja

intervenção humana na bacia hidrográfica, pode-se considerar a concentração natural igual à zero (HOEKSTRA et al., 2009; 2011).

Esse conceito de PH cinza é alvo de críticas por não tratar do volume real, de acordo com Francke et al. (2013) a PH cinza como descrito no manual de pegada hídrica poderia ser reforçada com orientações especializadas sobre a melhor forma de estimar os valores das frações de lixiviação-vazão, portanto, recentemente foi elaborado mais um guia para o componente cinza. Diante dos limites legais Deurer et al. (2011); Empinotti et al. (2013) indicam que a utilização de informações dos poluentes e suas concentrações usadas nos cálculos, venham sempre ao lado do seu resultado, facilitando assim a compreensão.

A contabilização da PH cinza depende dos poluentes utilizados e dos padrões estabelecidos na legislação local. No Brasil, o conselho nacional do meio ambiente – CONAMA, na resolução N° 357/2005 estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos de água.

Geralmente, os poluentes, no desenvolvimento de uma cultura compõem os fertilizantes (nitrogênio, fósforo, potássio e outros) pesticidas e inseticidas. Sendo que se deve considerar apenas o “fluxo residual” para os corpos d’água o que corresponde a uma parcela da aplicação total de fertilizantes ou pesticidas (HOEKSTRA et al., 2011).

Outro destaque é o volume de água necessário para resfriar a temperatura dos dejetos utilizados em indústrias. Estes também devem ser inseridos na PH cinza (MARZULLO; MATAI, 2011).

2.4.2 Avaliação da Pegada Hídrica

A avaliação da pegada hídrica auxilia no entendimento da interação existente entre as atividades e produtos com a redução da disponibilidade hídrica e a poluição da água. De acordo com a ISO 14046, essa avaliação contribui para analisar a magnitude dos potenciais impactos ambientais da água; identificar oportunidades de redução de desses impactos, associados a todo o ciclo de vida de um produto, processo ou organizações; na gestão estratégica de riscos dos recursos hídricos; facilitar a eficiência e aperfeiçoar a gestão das águas; informações aos gestores na indústria ou governo, para fins estratégicos e definições de prioridades; e fornecer as informações consistentes e confiáveis, baseadas em evidências científicas, relatando os resultados da pegada hídrica. A avaliação é um instrumento

incompleto e, portanto deve ser utilizado juntamente com outros mecanismos para uma compreensão mais abrangente nas tomadas de decisões (SEIXAS, 2011).

As informações da avaliação da pegada hídrica também podem ser utilizadas no processo de produtos e, portanto permitir ao consumidor optar por produtos que tenham uma PH menor. Seixas (2011) sugere a aplicação das informações da PH em rótulos de produtos, com isso as empresas adquiririam mais responsabilidade e cuidados com os recursos hídricos para não perder a competitividade no mercado. Atualmente um projeto de lei está em tramitação na Câmara (PL 5290/2016) para acrescentar essas informações de volume gasto de água em todo o processo de produção por quilograma do produto nas embalagens.

De acordo com Hoekstra et al. (2009, 2011) a avaliação consiste de atividades tais como: (i) quantificar e localizar a PH de processo, produtor, produto ou consumidor assim como quantificar no espaço e no tempo de uma determinada área; (ii) avaliar a sustentabilidade ambiental, social e econômica, dessa pegada; (iii) formular estratégias de resposta.

A avaliação completa da pegada hídrica compõe-se de quatro fases: definição de objetivos e escopo; contabilização da pegada hídrica; avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica e por fim a formulação de respostas à pegada hídrica. A primeira fase deve expor a razão desse estudo, quem está interessado (uma empresa, um comitê de bacia, um governo) e o porquê da realização do estudo. A segunda fase, os dados são finalmente coletados de acordo com as limitações da primeira. A terceira fase consiste em avaliar a PH com uma perspectiva ambiental, social e econômica. Por fim formular opções de estratégias e repostas aos resultados encontrados.

De acordo com Hoekstra et al. (2011) essas quatro fases da avaliação da PH são orientações, para o pesquisador, de como proceder uma análise completa. A realização das duas últimas fases não são obrigatórias, dependendo do objetivo do estudo, determinado na primeira fase, pode-se concentrar apenas na contabilização da PH, obtendo assim a quantificação da PH. Porém, caso queira avaliar a sustentabilidade da PH, deve-se seguir com a terceira fase; assim como, se há interesse em apresentar alternativas para reduzir a PH, é necessário avançar para a quarta fase.

2.4.3 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica.

Considerada a terceira fase da avaliação da PH, tem como objetivo comparar os resultados da PH, contabilizados na segunda fase, com a capacidade hídrica da bacia hidrográfica, em uma perspectiva ambiental, social ou econômica. A sustentabilidade pode ainda ser considerada a um nível local, de bacia hidrográfica ou nível mais global. Para Hoekstra et al. (2011) a avaliação da sustentabilidade da PH visa portanto, comparar a PH humana com aquela que a Terra pode suportar de modo sustentável e dependerá em parte dos contextos geográficos onde os componentes de cada pegada estarão inseridos.

Diversas considerações são relevantes para essa avaliação da sustentabilidade. Do ponto de vista geográfico, a pegada hídrica não será sustentável caso as demandas de vazões ou os padrões pré-estabelecidos da qualidade da água estiverem comprometidos. Considerando um processo, será insustentável em duas situações, primeiro quando em determinado período em uma bacia hidrográfica a PH global seja insustentável, ou segundo caso quando houver a possibilidade de reduzir as PHs. Já do ponto de vista de um produto, considera-se insustentável quando as PHs dos processos que fizeram parte da produção do produto forem insustentáveis (HOEKSTRA et al., 2011). Observa-se que a avaliação da sustentabilidade deve considerar as condições locais, as diferentes escalas, assim como os tipos de PH (verde, azul e cinza).

Na bacia hidrográfica, em uma perspectiva ambiental, a avaliação da sustentabilidade da PH, considera que a PH não deve comprometer qualitativamente e quantitativamente os recursos hídricos, tanto a água subterrânea como superficial, ou seja, a qualidade da água deve estar dentro dos limites padrões em seu estado natural, e também dentro dos limites das demandas de vazão ambiental, para assim preservar os ecossistemas aquáticos (HOEKSTRA et al., 2011). Ou seja, na bacia hidrográfica quando as demandas ambientais de água são comprometidas e quando a poluição excede a capacidade de assimilar os poluentes, esse comportamento pode ser considerado insustentável.

No ponto de vista social, uma bacia hidrográfica, é sustentável quando as necessidades básicas (beber, lavar e cozinhar, assim como produção de alimentos) dos indivíduos que vivem nessa bacia são satisfeitas. Outro ponto relevante socialmente é a equidade do acesso a água, sem que o uso a montante prejudique os usuários a jusante. Porém, a avaliação social é difícil, pois as necessidades humanas e as regras básicas para a equidade são critérios que não tem limites nítidos.

Quanto do ponto de vista econômico, a insustentabilidade da PH de uma bacia é quando a água não é alocada e utilizada de forma eficiente. Um exemplo de uso ineficiente é quando o valor cobrado pelo uso da água é menor do que seu custo econômico real, ou seja, para ser eficiente o benefício econômico deve exceder os custos (HOEKSTRA et al., 2011; MARTINS, 2014).

Para executar a avaliação da sustentabilidade deve-se inicialmente identificar e quantificar os critérios para cada perspectiva (ambiental, social e econômico). Posteriormente identificar os pontos críticos ('hot stops'), da sub-bacia em determinado período no qual a PH foi considerada insustentável. O terceiro passo é identificar e quantificar os impactos primários dos pontos críticos, ou seja, as consequências de quantidade e qualidade da água. Por fim, o quarto passo é identificar e quantificar os impactos secundários dos pontos críticos, que são os danos resultantes dos impactos primários, podendo ser medidos por extinção de espécies, alterações da saúde humana, redução da biodiversidade, segurança alimentar e renda das atividades econômica dependentes da água (HOEKSTRA et al., 2011; MÜLLER, 2012).

Como a avaliação da sustentabilidade pode ser considerada a diferentes níveis, sendo cada uma com suas respectivas questões críticas, é importante identificar essas questões (Quadro 1):

Quadro 1: Questões críticas que devem ser postas para a avaliação da sustentabilidade da pegada de água.

Escala	Perspectiva Ambiental	Perspectiva Social	Perspectiva Econômica
Micro-escala: local	<ul style="list-style-type: none"> • A PH verde favorece a produção ao custo da vegetação natural e da biodiversidade? • A PH azul viola os requisitos ambientais? • A PH cinzenta viola os padrões de qualidade da água local? 	<ul style="list-style-type: none"> • A PH priva outros utilizadores de água? 	<ul style="list-style-type: none"> • A produtividade de água é ótima? • A água pode ser poupada sem reduzir a produção? • O preço de água para o utilizador está abaixo do seu custo econômico real, resultando no uso ineficiente?
Meso-escala: bacia hidrográfica	<ul style="list-style-type: none"> • As pegadas hídrica azul e verde conduzem a uma mudança nos padrões de escoamento e, portanto, afeta os requisitos ambientais dos caudais a jusante? • A PH cinza contribui para a violação dos padrões de qualidade de água a jusante? 	<ul style="list-style-type: none"> • As pegadas de hídrica azul, verde ou cinzenta afetam os utilizadores a jusante sem indemnização adequada ou repartição de benefícios? 	<ul style="list-style-type: none"> • A alocação de água é ideal, no tempo e no espaço, pelos diferentes utilizadores? • Existem efeitos externos que não foram compensados aos utilizadores a jusante?

...continua

...continuação

Macro-escala: além da bacia hidrográfica, global	<ul style="list-style-type: none"> • Pode a PH para determinado uso ser sustentável, dado o contexto mais amplo da limitada disponibilidade de água doce no mundo? 	<ul style="list-style-type: none"> • É justo ter essa PH para esse uso, dado o contexto, mais amplo, da limitada disponibilidade de água doce no mundo? 	<ul style="list-style-type: none"> • Os padrões de produção regional e de comércio de produtos de uso intensivo de água são ótimos (eficientes), dado o contexto da limitada disponibilidade de água doce e a sua irregular distribuição em todo o mundo? • Os produtos de uso intensivo de água exportados a partir de regiões com escassez de água são de baixo custo?
---	---	--	--

Fonte: Hoekstra et al. (2009)

2.5 ISO 14046

A poluição, a escassez e a demanda crescente por água, exigem debates internacionais sobre a gestão hídrica no mundo e o desenvolvimento de metodologias, como por exemplo a avaliação do ciclo de vida (ACV) e a pegada hídrica (PH), para avaliar o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente,

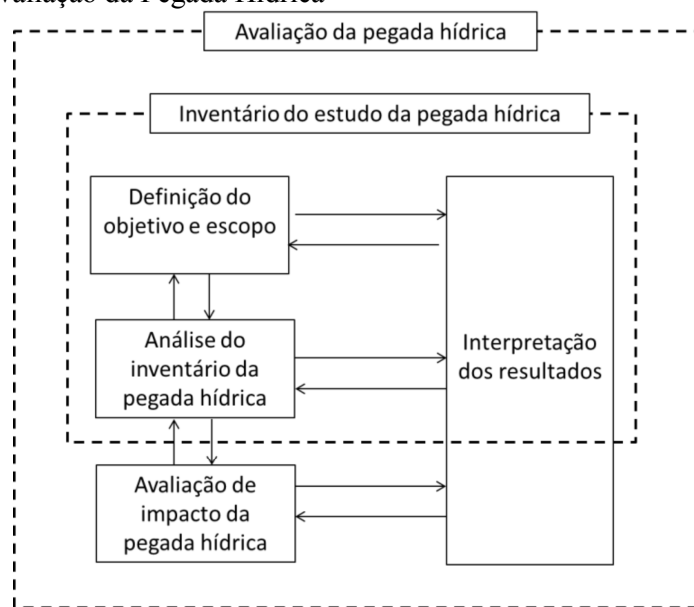
Diante das diversas técnicas metodológicas de avaliações, é necessário padronizá-las e torná-las apropriadas ao uso a nível internacional. No que diz respeito a técnica da pegada hídrica foi desenvolvida pela ISO (organização internacional de normalização) a norma internacional ISO14046. Esta Norma Internacional fornece princípios, requisitos e orientações para a realização de uma avaliação da PH de produtos, processos e organizações, como uma avaliação independente, ou como parte de uma avaliação ambiental mais abrangente, com base na avaliação de impactos da ACV, de acordo com a ISO 14044.

Esta ISO, teve início com discussões em 2009, principalmente entre profissionais que trabalhavam com estudos de avaliação do ciclo de vida (ACV), e com estudos referentes à água. Apenas em maio de 2014 a ISO 14046 foi publicada, após diversas reuniões e discussões dos participantes da comissão de estudos sobre pegada hídrica. No Brasil, entre 10 a 15 pessoas participaram desses encontros, contando com representantes de institutos de pesquisas e empresas que atuam no ACV e uso de água (COLTRO; KARASKI, 2015).

De acordo com a ISO 14046, a avaliação da pegada hídrica identifica os impactos ambientais potenciais relacionados à água, identifica a quantidade de uso de água e mudanças na sua qualidade, e inclui dimensões geográficas e temporais relevantes, utilizando-se do conhecimento hidrológico.

Uma avaliação da PH de acordo com esta norma devem incluir as quatro fases de avaliação do ciclo de vida: objetivo e definição do escopo; análise de inventário de pegada hídrica; avaliação de impacto de pegada hídrica e interpretação dos resultados (Figura 1)

Figura 1: Fases da avaliação da Pegada Hídrica



Fonte: Adaptado da ISO 14046:2014

Porém, a ISO 14046, afirma que essa avaliação de água por si só é insuficiente na descrição dos conjuntos de impactos ambientais pontencias de produtos, processos ou organizações, pois existem outros aspectos ambientais que devem ser considerados, tais como: emissão de gases de efeito estufa, mudanças no uso do solo e biodiversidade. Portanto, para a avaliação do impacto ambiental global de produtos, devem-se somar à pegada hídrica esses outros aspectos ambientais.

2.6 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

O ciclo de vida consiste em todas as etapas e processos que envolvem o desenvolvimento de um produto ou serviço, e envolve toda a cadeia desde extração de recursos naturais até a disposição final. A avaliação do ciclo de vida (ACV) de um produto irá identificar quantificar e qualificar os impactos ambientais durante o ciclo de vida de um produto ou serviço.

De acordo com a ISO 14040 (2006) a avaliação do ciclo de vida é considerada o acervo e a avaliação tanto das entradas como saídas e dos potenciais impactos ambientais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. As etapas e princípios são destinados nas séries de normas da ISO 14000: 14040:2006 e 14044:2006. No Brasil as mesmas são representadas pela NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009.

Considerada, portanto, uma das várias técnicas de gestão ambiental, porém não necessariamente é a mais adequada a ser utilizadas em todas as situações. A ACV não considera os aspectos econômicos ou sociais de um produto. Em sua metodologia as etapas que constitui a ACV são as mesmas mencionadas na ISO 14046. São as quatro fases: a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação de resultados.

2.7 Água Virtual

A base para o conceito pegada hídrica está intimamente ligada ao conceito de água virtual. O conteúdo de água virtual de um produto, bens ou serviços refere-se ao volume de água utilizado na sua produção até o consumidor final (ALLAN, 1999; HOEKSTRA, 2003b) e permite inter-relacionar três pilares, a água, alimento e comércio. A disseminação do termo foi acelerada após 1995, porém o reconhecimento internacional foi obtido em 2002, quando foi discutido o termo em *International Expert Meeting on Virtual Water Trade, na Holanda* (ROCHA, 2014).

Este conceito foi introduzido por John Anthony Allan em 1993 e definindo como a água incorporada em *commodities* agrícolas. Hoekstra e Hung (2002) definiram que a água virtual representa a quantidade de água embutida em produtos comercializados. Ou seja, é o comércio indireto de água que está de certa forma embutida em produtos, principalmente agrícola.

Várias discussões nas comunidades científicas a respeito de água virtual foram originadas posteriormente. Porém, o conceito mais relevante foi produzido por John Allan, ao destacar a indispensabilidade da água na produção de alimentos e consequentemente o aumento do consumo devido ao crescimento da população e seus padrões de consumo, implicando no uso direto dos recursos hídricos (ALLAN, 1998).

Quantificar os volumes comercializados de água virtual é uma atividade complexa. Para o cálculo deve-se considerar a água consumida em todo o processo de produção das mercadorias, assim como as características específicas de cada região produtora, incluindo os aspectos ambientais (CHAPAGAIN et al., 2005). Esse termo virtual está relacionado ao fato da água utilizada em produção de determinado produto não está contida nele mesmo. O teor real da água é insignificante em alguns casos, comparando-se ao teor virtual. Um exemplo é o teor virtual de água no trigo é 1300m³/ton, enquanto o teor real é inferior a 1m³/ton (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2008).

Uma alternativa para os países com escassez de água é a importação de água virtual. Chapagain et al. (2006), apresentam que uma nação pode preservar seus recursos hídricos nacionais importando produtos que tenham uma grande quantidade de água, ao invés de produzi-lo internamente, sendo que esta “economia” de água pode ser usada em outras culturas agrícolas de maior valor. Portanto, países com escassez de água é mais atraente, para alcançar sua segurança hídrica, a importação de produtos que utilizem mais água, ao invés de produzi-los.

Alguns estudos são realizados a fim de compreender o fluxo de água virtual no comércio de produtos entre os países, baseados nos principais produtos no mercado internacional. Hoekstra e Hung (2002), afirmam que no comércio global a movimentação de água virtual foi de 695Gm³/ano em média durante o período da pesquisa (1995-1999). Os mesmos autores quantificaram nesse mesmo tempo os maiores importadores e exportadores de água virtual apresentado na Tabela 6:

Tabela 6: Os 10 principais países exportadores e importadores de água virtual.

Países	Volume exportado (10 ⁹ m ³)	Países	Volume importado (10 ⁹ m ³)
Estados Unidos	758.3	Siri	428.5
Canadá	272.5	Lanka	297.4
Tailândia	233.3	Japão	147.7
Argentina	226.3	Holanda	112.6
Índia	161.1	Coreia	101.9
Austrália	145.6	China	101.7
Vietnam	90.2	Indonésia	82.5
França	88.4	Espanha	80.2
Guatemala	71.7	Egito	67.9
Brasil	45.0	Alemanha	64.3
		Italia	

Fonte: Adaptado de Hoekstra e Hung 2002.

Em estudos mais recentes Silva et al.(2016) apresentam que a exportação de água virtual pelo Brasil é 67,1 bilhões m³/ano, sendo a Europa o maior consumidor com 41% do total exportado do Brasil. Enquanto que a água virtual importada representam 12,3 bilhões m³/ano, dos quais 11,2 bilhões m³/ano, ou seja 91% do total importado, são de países da América do Sul, destacando-se Argentina, Uruguai e Paraguai, com 6,4, 1,5 e 1,2 bilhões m³/ano respectivamente, principalmente pela importação de arroz, feijão, trigo, milho e carne bovina. Entre as commodities agrícolas no Brasil a carne bovina (21%) é a maior contribuição para a pegada hídrica total do consumo nacional.

A água virtual pode ter mesmo conceito no contexto de produção e consumo. No conceito de produção a água virtual é utilizada no mesmo local em que o produto será produzido. Enquanto no termo de consumo, a água virtual é indicada como o volume que seria utilizado para produzir a *commodite* no local em que a mesma seria consumida (CHAPAGAIN; HOEKSTRA, 2003). Diferenciando a produção do consumo apenas pelo local em que há a confecção do produto. Essas abordagens são importantes para avaliar e quantificar o comércio de água que está embutido nos produtos, e assim poder negociar o quanto valeria para o país importador produzir a *commodite*.

Destaca-se ainda a importância de especificar as características do local por influenciar no volume de água virtual final. Por exemplo, em regiões com maior índice pluviométrico e menor evapotranspiração, menor será o consumo de água para irrigação. Hoekstra (2003a) afirma essa ideia, quando expõe que produzir uma tonelada de certo grão, em região árida pode demandar o dobro do volume de recursos hídricos, ou até mais, do que produzir em uma região úmida. Hoekstra e Hung (2002) apresentaram que para um quilo de grão, cultivado em sequeiro e em condições climáticas favoráveis necessita de 1 a 2m³ de água, ou seja de 1000 a 2000 kg de água, enquanto em uma região em condições climáticas não favoráveis (alta temperatura e evapotranspiração) é cerca de 3000 a 5000 kg de água.

A importância da água virtual é superior à apenas saber quantitativamente o volume consumido de água no processo, mas serve também como apoio em gestões políticas. A importação de produtos que demandam de mais recurso hídrico é recomendada para países com deficiências hídricas, adotando assim a boa gestão política. Dessa maneira, se desperta o interesse em mais debates e prática desse conceito na forma de comercialização da água virtual, na segurança alimentar e sustentabilidade hídrica, entre os países que negociam os produtos.

El-Sadek (2010) aposta esse fundamento da água virtual como estratégia de política, com o aumento da eficiência do uso dos recursos hídricos. Porém, antes da aplicação do conceito de água virtual, deve-se ter um aprofundamento sobre as vantagens e desvantagens das condições de cada lugar que está produzindo e/ou consumindo o produto. Para atingir uma máxima eficiência da utilização do recurso hídrico é primordial o conhecimento prévio da disponibilidade de água e das condições climáticas, sobretudo os aspectos ambientais.

A água virtual e a pegada hídrica são ferramentas essenciais em tomadas de decisões referentes aos recursos hídricos. A diferença entre esses dois termos é apresentada por Hoekstra e Hung (2005), a água virtual se refere apenas a um só volume de água, enquanto a pegada hídrica é um indicador multidimensional que apresenta os tipos de água (azul, verde ou cinza) e para onde e quando foi usada durante todo o processo. Velázquez et al. (2011), apontam que a água virtual está relacionado com consumo, enquanto a PH a produção, podendo assim identificar os atores consumidores ou produtores, e servi de base para a gestão dos recursos hídricos.

2.8 Agrotóxicos

O setor agropecuário exerce grande influência na economia do Brasil, sendo o país um dos maiores produtores e exportadores dos produtos derivados dessa atividade. Em decorrência disto há investimentos, sobretudo, com a utilização de agrotóxicos para manter a produção, configurando ao Brasil o maior consumidor de agrotóxico no mundo (PIGNATI et al. 2017).

A aplicação de agrotóxicos no Brasil, iniciou-se basicamente entre 1960-70, época marcada pelo processo progressivo de automação das lavouras e o uso destas substâncias (PERES et al., 2003). Em 2008 o Brasil excedeu os Estados Unidos e passou a liderar o comércio mundial de agrotóxico, em um período de 2000 a 2010 houve um crescimento de 190% contra 93% do mercado global, com uma produção de 833 mil toneladas e importação de 246 mil toneladas, em 2012. Entre a comercialização dos tipos de agrotóxicos estão 45% para herbicidas, 14% fungicidas e 12% inseticidas e demais categorias 29% (ANVISA, 2012).

Estas substâncias são regidas pela lei N° 7.802/ 89 e o decreto N° 4.704/02 que a regulamenta, afirmando que agrotóxicos são: produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, no armazenamento e

beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens, na proteção de florestas, nativas ou plantadas, e de outros ecossistemas e de ambientes urbanos, hídricos e industriais, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, bem como as substâncias e produtos empregados como desfolhantes, dessecantes, estimuladores e inibidores de crescimento.

Há muitas formas de classificar os agrotóxicos, por exemplo, de acordo com a finalidade, quanto a toxicidade e a periculosidade ambiental. Quanto a finalidade, pode-se citar os herbicidas para eliminar ervas daninhas; fungicidas para matar fungos e inseticidas para insetos. Quanto a toxicidade, de acordo com a portaria N°03/92 do Ministério da Saúde, são classificados como produtos extremamente tóxicos - classe I; produtos altamente tóxicos - classe II; medianamente tóxicos - classe III e poucos tóxicos - classe IV. Quanto a periculosidade ambiental, tem-se na portaria N° 84/96 do IBAMA, são produtos altamente perigoso - classe I; muito perigoso - classe II; perigoso - classe III e pouco perigoso - classe IV

O consumo médio de agrotóxicos em relação à área plantada no Brasil é de 12 L.ha⁻¹, em 2011, sendo o cultivo da soja representado pelo consumo de 40%, seguida do milho com 15%, cana-de-açúcar 10% e as demais culturas (CARNEIRO et al., 2015). o Brasil consome em média 877782 t de agrotóxicos por ano, a região que mais contribui para esse resultado é o Centro-Oeste, com o uso de 16,14 kg.ha⁻¹ e o que menos contribui é a região Norte, com 2,41 kg.ha⁻¹. No Nordeste 3,61 kg.ha⁻¹ são consumidos em média, sendo em Pernambuco esse valor é de 2,66 a 3,9 kg.ha⁻¹ (BOMBARDI, 2017).

Entre os ingredientes ativos (composto ativo de um agrotóxico) mais vendidos no Brasil em 2017 foram o Glifosato com 173150.75 t, seguido do 2,4D com 57389,35 t, utilizados no cultivo de cana-de-açúcar. A atrazina e o dicloreto de paraquete, utilizados nesta atividade, ficaram no sexto e oitavo lugar em uma posição dos 10 mais vendidos no mesmo ano. Em Pernambuco os ingredientes ativos 2,4D e o Glifosato, foram os mais vendidos com 607 e 474 toneladas, respectivamente (IBAMA, 2017).

No Brasil existem 2005 agrotóxicos registrados exclusivamente para o cultivo de cana-de-açúcar, que corresponde a 65 formulações comerciais de ingredientes ativos, dentre os quais as maiores concentrações foram para herbicidas, seguida de inseticidas, fungicidas e outros. Desse total, 655 foram classificados como medianamente tóxicos e 912 foram como muito perigoso ao meio ambiente. Em 2018, o número de registro foram 160 produtos,

correspondendo a 37 formulações (AGROFIT, 2018). A Tabela 7 apresenta os ingredientes ativos permitidos no cultivo de cana-de-açúcar, nos quais 53% são herbicidas.

Tabela 7: Ingredientes ativos permitidos no cultivo de cana-de-açúcar de acordo com o AGROFIT.

Classe	Ingrediente Ativo
Herbicida	2,4D, Acetocloro, Alaclor, Ametrina, Amicarbazona, Asulam, Atrazina, Bispiribaque-sódico, Carfentrazone-etílica, Cianazina, Cletodim, Clomazona, Dicloreto de paraquete, Diclosulam, Diuron, Etoxissulfurom, Flazasulfurom, Fluazifope-P-butílico, Flumioxazina, Glifosato, Glifosato-sal de isopropilamina, Halossulfurom-metilico, Hexazinona, Imazapique, Imazapir, Iodosulfurom-metilico, Isoxaflutol, MCPA, Mesotriona, Metolacloro, MSMA, Oxadiazona, Oxifluorfem, Paraquate, Pendimetalina, Picloram, Simazina, S-metolacloro, Sulfentrazone, Sulfometurom-metilico, Sulfosato, Tebutiuron, Tiazopir, Trifloxissulfurom-sódico, Trifluralina.
Inseticida	Alfa-cipermetrina, Cadusafós, Clorantraniliprole, Etiprole, Fipronil, Imidacloprido, Lambda-cialotrina, Novalurom, Terbufós, Tiametoxam Triflumurom.
Fungicida	Epoxiconazol, Azoxistrobina, Ciproconazol, Fludioxonil, Metalaxil-M, Picoxistrobina, Triadimefom, Triadimenol.
Acaricida/ Inseticida	Abamectina, Aldicarbe, Bifentrina, Carbofurano, Endossulfam, Fluazinam, Lufenurom, Triclorfom.
Feromônio sintético	Acetato de (Z)-7-dodecenila, Acetato de (Z)-9-tetradecenila, N-2'S-metilbutil-2- metilbutilamida, Acetato de (Z)-11-hexadecenila.
Regulador de crescimento	Ácido giberélico, Etefom, Trinexapaque-etílico.
Inseticida biológico/ microbiológico	<i>Bacillus thuringiensis</i> , <i>Metarhizium anisopliae</i> , <i>Steinernema puertoricense</i>
Agente biológico de controle	<i>Cotesia flavipes</i>

Fonte: Acayaba (2017)

De acordo com Machado Neto (1991), os recursos hídricos contaminados por agrotóxicos comprometerá todos os componentes do ecossistema, sejam bióticos ou abióticos, uma vez que a água está presente em todas as partes e a água é um elemento fundamental para a sobrevivência dos organismos.

3 MATERIAL E MÉTODO

Os processos metodológicos, empregados na presente tese, caracterizam-se por serem do tipo exploratório-descritivo. De acordo com Gil (2010), a pesquisa exploratória tem a finalidade de proporcionar maior familiaridade ao pesquisador com o problema, permitindo o desenvolvimento de hipóteses. Enquanto a pesquisa descritiva, de acordo com mesmo autor, descreve as características de determinado fenômeno que, podem ser mensuráveis ou não, assim como a relação existente entre as variáveis encontradas, ou seja, interpreta e analisa os fatos.

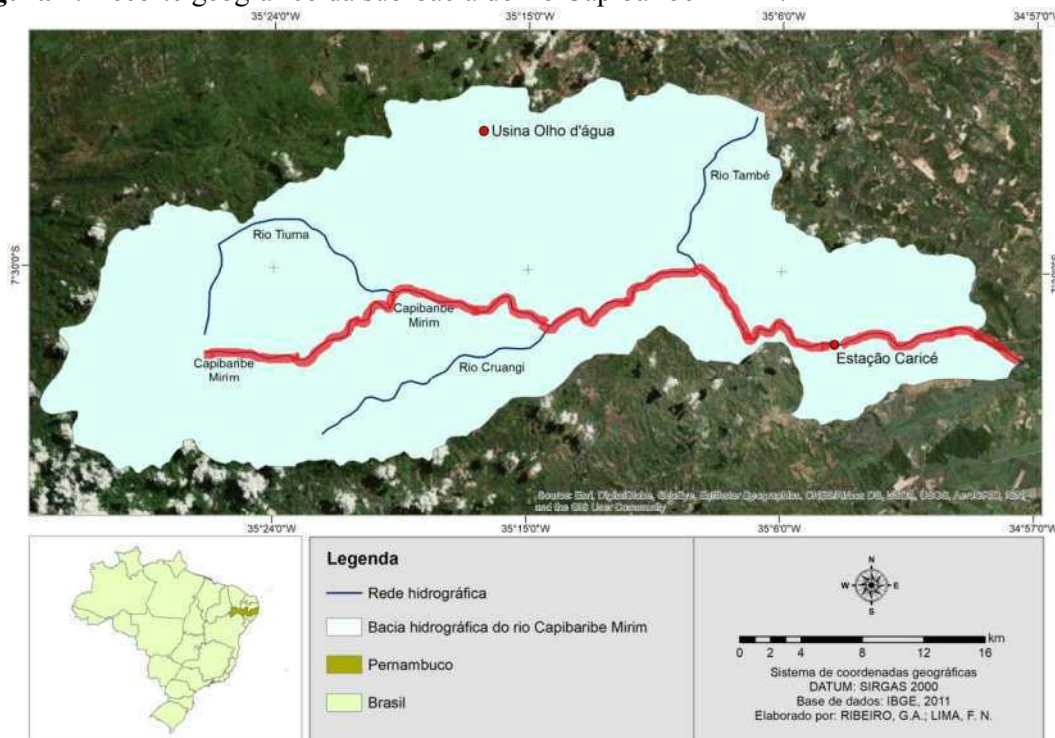
Quanto a abordagem adotada foi a quantitativa, visto que se pôde mensurar os dados estudados. Esse tipo de abordagem na pesquisa possibilita mensurar uma grandeza e gerar resultados que podem ser interpretados como tendências (PATTON, 2015).

O estudo foi realizado na sub-bacia do Rio Capibaribe Mirim, localizado em grande parte na Microrregião da Mata Setentrional do Estado de Pernambuco. Para as análises dos dados da agroindústria canavieira, escolheu-se a usina Olho D'Água, a qual está inserida dentro da sub-bacia, no município de Camutanga - Pernambuco. A base metodológica adotada foi o manual publicado pela *Water Footprint Network* (HOEKSTRA et al., 2011) e o relatório de pesquisa em água do Instituto *UNESCO - IHE* (FRANKE et al., 2013).

3.1 Características da área de estudo

A área de estudo é a sub-bacia hidrográfica do Rio Capibaribe Mirim, que está inserida na bacia do rio Goiana (Figura 2). Seu rio principal, o Capibaribe Mirim, nasce no município de São Vicente Férrer, entre a Zona da Mata e Agreste, e seu exutório no Rio Goiana. Seus principais afluentes pela margem direita é o rio Sirigi e Cruangi; pela margem da esquerda recebe contribuição dos rios Tiúma e També. A principal atividade encontrada nesta sub-bacia é o cultivo de cana-de-açúcar, mas outras atividades também faz o uso direto e indireto de seus recursos hídricos, tais como indústria de papel, policultura e uso doméstico. Parte das cidades por onde o rio flui não possuem esgotamento sanitário, dispondo apenas de coletas individuais, resultando na poluição do rio (CPRH,2003).

Figura 2: Recorte geográfico da sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a contabilização das pegadas hídricas da agroindústria canavieira, selecionou-se os dados da safra 2016/2017 (1ª safra) e 2017/2018 (2ª safra) de uma usina inserida nesta sub-bacia Capibaribe Mirim. Diante disto, para conduzir o experimento, escolheu-se a Fazenda Olho D'Água, Latitude 7°25'7''S, Longitude 35°16'35''W e altitude de 109m, na qual é cultivada principalmente a cultura de cana-de-açúcar. De acordo com a própria usina, ela é uma irrigante de grande porte, com aproximadamente 30000 ha, dos quais 20000 ha são cultivados com cana-de-açúcar, e está localizada no município de Camutanga – PE, a 110 km da capital aproximadamente.

O solo da região (Figura 3) é classificado predominantemente como Argissolo Vermelho eutrófico abruptico, com textura média (leve)/argilosa, A moderado, fase relevo suave ondulado (PVe1) (EMBRAPA, 2006). Segundo Santiago et al. (2017) os valores de pegada hídrica podem ser diferentes devido ao tipo de cultivar, manejo das plantas, e sobretudo, o tipo de solo. Franke et al. (2013) afirmam que a metodologia de avaliação da PH cinza deve incluir as características locais do solo e clima, uma vez que esses fatores influenciam no potencial de lixiviação/escoamento dos agrotóxicos.

Figura 3: Perfil de Argissolo Vermelho Eutrófico abruptico, textura média (leve) /argilosa, A moderado, fase relevo suave ondulado.



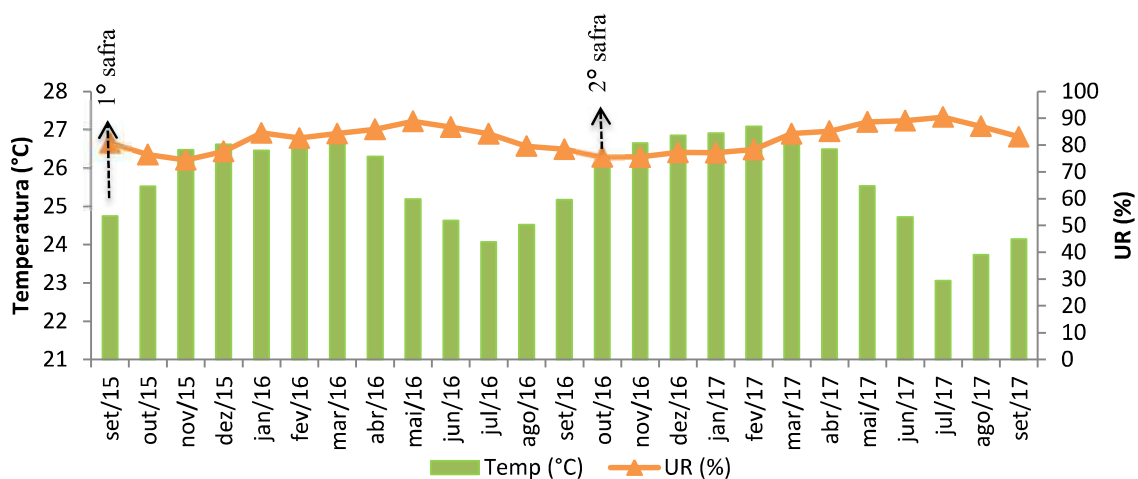
Fonte: Mendonça (2013)

O clima segundo Köppen é do tipo As^1 , caracterizando-o como clima quente e úmido, apresentando chuvas de outono a inverno. A temperatura média anual é $25,3^{\circ}C$, e precipitação 1100mm, com seis meses secos (MENDONÇA, 2013).

A umidade relativa média do ar (UR) variou de 75 a 89%, para os meses de novembro/15 e maio/16, na primeira safra, com 81% de UR média. Para a segunda safra, variou de 76 a 91% , relativos aos meses de novembro/16 e julho/17, nesta ordem, e em média a UR foi 83%. No geral, a UR foi mais baixa entre os meses de setembro a fevereiro (Gráfico 1), período que coincide com a redução das precipitações. A temperatura variou de $24,1$ a $26,8^{\circ}C$, na primeira safra, para os meses julho/16 e março/16, enquanto a segunda safra foi de $23,1$ a $27,1^{\circ}C$, relativo aos meses de julho/17 e fevereiro/17 (Gráfico 1). No geral, temperatura média foi $25,6^{\circ}C$ nas duas safras.

¹ Pertencente ao Grupo tropical do tipo savânico, apresenta-se como clima quente com chuva no inverno onde o mês menos chuvoso de verão recebe menos de 1/3 das precipitações do mês mais chuvoso de inverno (Dubreuil et al., 2018).

Gráfico 1: Temperatura (°C) e umidade relativa do ar - UR (%), médias, para a região Camutanga, PE, no período de setembro de 2015 a setembro de 2017.

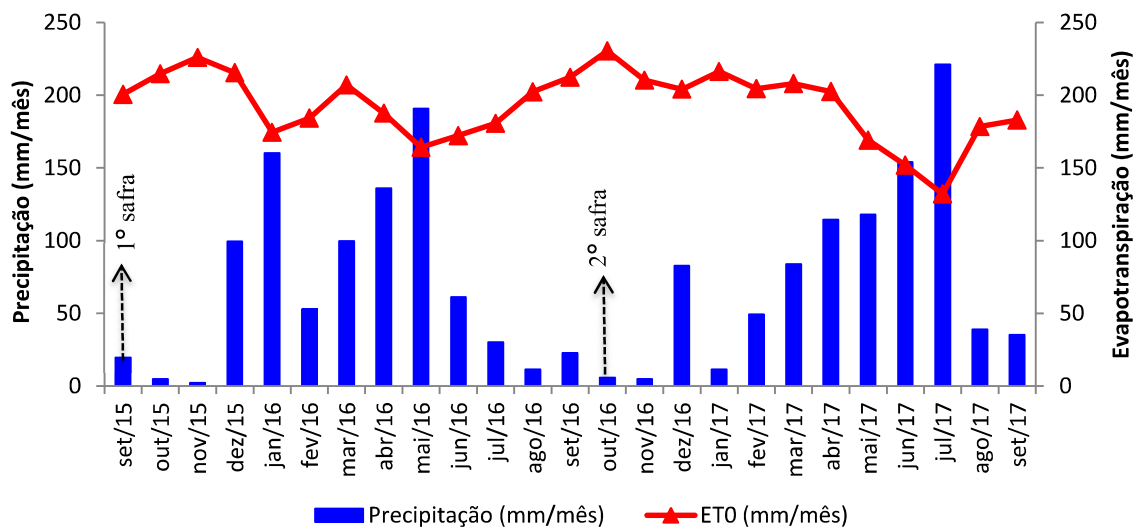


Fonte: Elaboração própria.(2019)

A precipitação pluviométrica acumulada, medida em mm, na primeira safra, até o dia 17 de outubro de 2016, foi 889,8 mm, sendo os meses de dezembro a junho as maiores concentrações. Na segunda safra, o acumulado até o dia 07 de setembro de 2017, foi 884,2 mm, sendo o crescimento entre os meses de fevereiro a julho. Portanto, mesmo com o período mais curto da segunda safra, o acumulado da precipitação foi praticamente o mesmo ao compará-lo com a primeira safra. Observa-se que os meses de maio/16 e julho/17 foram os que acumularam maior volume de chuva, com 191 e 221,2mm, respectivamente, para a 1ª e 2ª safra (Gráfico 2). Esses valores, indicam que durante esses anos a precipitação pluviométrica foi abaixo da média para o local, como aponta Mendonça (2013) e Silva (2018) um valor de 1100mm.

A evapotranspiração de referência - ETo, apresentada em mm, na primeira safra foi 2664,94 mm e na segunda safra foi 2032,07mm. As menores concentrações de ETo ocorreram no período de janeiro a julho, em ambas as safras, que coincide com período de maior precipitação. Os menores valores de ETo foram 164,26 mm (maio/16) e 132,24 mm (julho/17) na 1ª e 2ª safra, respectivamente; e os maiores foram 230,6mm (outubro/16) e 210,43mm (novembro/16) (Gráfico 2).

Gráfico 2: Precipitação pluvial (mm/mês) e evapotranspiração de referência (ETo), na região de Camutanga, PE, no período de setembro de 2015 a setembro de 2017.



Fonte: Elaboração própria.

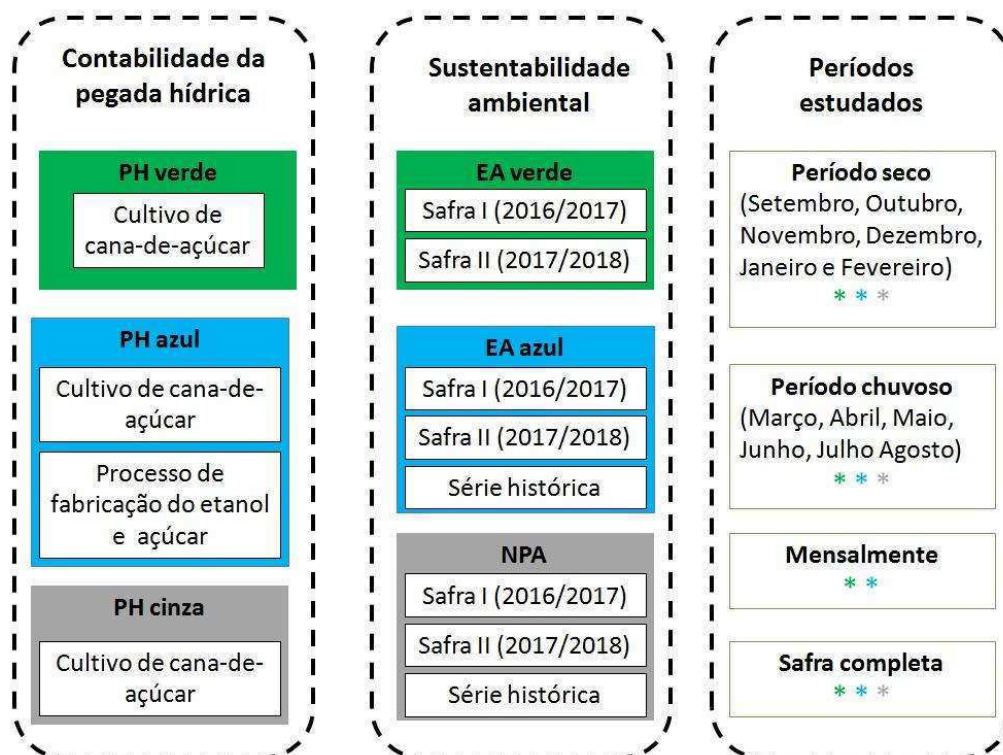
3.2 Análise dos dados

Seguindo a proposta apresentada no Manual de Avaliação da Pegada Hídrica e na ISO 14046, a avaliação consiste de quatro fases: definição de objetivos e escopo; contabilização da PH; avaliação da sustentabilidade e formulação de respostas à PH. Portanto, caracterizou-se essas fases para melhor apresentação da metodologia adotada e dos resultados encontrados no presente trabalho.

Os dados para quantificar a PH da cana-de-açúcar foram referentes a um talhão da usina Olho D'água, cultivada com a variedade RB867515, e calculada para as safras 2016/2017 (Primeira safra - I) e 2017/2018 (Segunda safra - II). Contabilizou-se também a PH para o processo de fabricação dos subprodutos (etanol e açúcar), assim como a PH total dos mesmos.

Quanto a sustentabilidade ambiental da sub-bacia considerou-se a área total de cultivo de cana-de-açúcar da usina, dentro da sub-bacia. Analisou-se a sustentabilidade para as duas safras (2016/2017 e 2017/2018) e para uma série histórica (2000 - 2017) (Figura 4). Na série utilizou-se a PH, a área de cultivo e a produção de cana-de-açúcar como a média das duas safras mencionadas, e a vazão referente a própria série.

Figura 4: Esquema metodológico geral.



EA = escassez de água; NPA = nível de poluição da água; PH = pegada hídrica; * = escassez de água verde, * = escassez de água azul; * = nível de poluição da água
 Fonte: Elaboração própria (2019).

Os períodos estudados foram os seco (crítico) e chuvoso (não crítico), considerando a escassez de água (EA) verde, azul e cinza, para as duas safras e série histórica. Analisou-se também mensalmente a EA verde e azul, das duas safras, ou seja, de acordo com a evapotranspiração acumulada por mês e da vazão média mensal. Para o período completo das safras, a sustentabilidade ambiental foi analisada pela EA verde, azul e o NPA, usando-se a evapotranspiração acumulada e a vazão média para toda a safra.

3.3 Fase I: Definição de objetivos e escopo

O presente trabalho objetivou, sobretudo, contabilizar as pegadas hídricas da agroindústria canavieira e a sustentabilidade ambiental dessa atividade na sub-bacia. Assim, a PH da agroindústria resultou na PH verde, azul e cinza da cana-de-açúcar cultivada em campo, mais a PH azul do processo de fabricação dos subprodutos (etanol e açúcar) da usina.

A pegada hídrica do processo dos subprodutos resultantes na usina é representada apenas pela PH azul. Não considerou a PH verde, pois essa se refere ao consumo de água de chuva, que não tem dentro da usina. Também não se analisou a PH cinza dos subprodutos, pois o descarte de água residual e de vinhaça são utilizados na fertirrigação da cana-de-açúcar, retornando, portanto ao primeiro ponto do processo que é o cultivo de cana-de-açúcar, o qual já teve sua contabilização da PH cinza calculado anteriormente.

Segundo Hoekstra et al. (2011), quando a água é reutilizada para o mesmo fim ou outro, não há lançamento do efluente no meio ambiente, logo a PH cinza será zero. Diante disto, calculou-se apenas a PH cinza do cultivo cana-de-açúcar, pois a aplicação no solo de substâncias (fertilizantes ou agrotóxicos) pode lixiviar para água subterrânea ou escorrer superficialmente em direção ao curso d'água.

Para a PH da cana-de-açúcar, o período de dados das safras correspondentes foram: 2016/2017 (8º corte), que ocorreu entre 01 de setembro de 2015 a 17 de outubro de 2016, a qual obteve uma produção de 1801,21 t em 18,42 ha; e a safra 2017/2018 (9º corte), entre 18 de outubro de 2016 e 07 de setembro de 2017, com 1676,72 t na mesma área. Portanto, utilizou-se uma resolução temporal mensal para as fontes de dados, as quais foram adquirida em literatura, banco de dados disponíveis e principalmente dados fornecidos pela usina Olho D'Água.

Para a sustentabilidade ambiental da atividade canavieira, as safras foram 2016/2017, 2017/2018 e a série histórica de 2000 a 2017. Considerou-se a área e produção de 20500 ha com 1488905 t de acordo com a primeira safra; 20967 ha e 1607894 t, para segunda safra; e para a série histórica foi a média da área e produção das safras, porém com a vazão real da série.

Os períodos estudados das vazões reais estabelecidas para os cálculos de sustentabilidade foram: período seco, quando as vazões são inferiores; período chuvoso, quando as vazões são melhores; mensalmente (considerando as vazões médias de cada mês das safras) e por fim a vazão para o período da safra completa (relacionada com a vazão média total para o período completo da safra).

3.4 Fase II: Contabilização da pegada hídrica.

A contabilização da pegada hídrica foi realizada para a cana-de-açúcar (PH_{cana}) assim como para o processo de fabricação do etanol ($PH_{proc. do etanol}$) e açúcar ($PH_{proc. do açúcar}$) todos determinados de acordo com Hoekstra et al. (2011).

Na PH_{cana} calculou-se a evapotranspiração das componentes verde e azul, enquanto para componente cinza, avaliou-se os poluentes utilizados nas safras como descrito por Franke et al.(2013) . A $PH_{cana-de-açúcar}$ [m^3/t] resultou no somatório das pegadas da cana-de-açúcar, Equação 4:

$$PH_{cana-de-açucar} = PH_{verde} + PH_{azul} + PH_{cinza} \quad (4)$$

3.4.1 Pegada hídrica verde e azul da cana-de-açúcar

O calculo da PH verde e azul foi determinado de acordo com a Equação 5 e 6, a qual envolve a demanda hídrica verde e azul da cultura e a produtividade pela cultura

$$PH_{verde} = \frac{DHC_{verde}}{P} \quad (5)$$

$$PH_{azul} = \frac{DHC_{azul}}{P} \quad (6)$$

Em que: PH_{verde} = pegada hídrica verde (m^3/t); PH_{azul} = pegada hídrica azul (m^3/t); DHC_{verde} = demanda hídrica verde (m^3/ha); DHC_{azul} = demanda hídrica azul(m^3/ha); P = produtividade (t/ha).

Sobre condições ótimas de crescimento da cana-de-açúcar, a demanda hídrica (DHC) corresponde a evapotranspiração total durante todo o ciclo da cultura (ET) de acordo com as Equações:

$$DHC_{verde} = \beta \sum_{d=1}^{pdc} ET_{verde} \quad (7)$$

$$DHC_{azul} = \beta \sum_{d=1}^{pdc} ET_{azul} \quad (8)$$

Onde: DHC_{verde} = demanda hídrica verde (m^3/ha); DHC_{azul} = demanda hídrica azul (m^3/ha); $\beta = 10$ (fator de conversão); ET_{verde} = Evapotranspiração diária de água verde (mm/dia); ET_{azul} = Evapotranspiração diária de água azul (mm/dia).

O fator de conversão β converte a altura da água em milímetros (mm), para volume de água na superfície do solo em metros cúbicos por hectares (m^3/ha). O somatório da evapotranspiração é relativo aos dias do crescimento da cana-de-açúcar até seu corte.

A evapotranspiração da água verde (ET_{verde}) foi determinada pelo mínimo entre a evapotranspiração total da cultura (ET_c) e a precipitação efetiva (P_{eff}):

$$ET_{verde} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (9)$$

A evapotranspiração da água azul (ET_{azul}) foi estimada como máximo da diferença entre a evapotranspiração total da cultura (ET_c) e a precipitação efetiva (P_{eff}).

$$ET_{azul} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (10)$$

De acordo com a equação acima, quando a precipitação efetiva for maior que a evapotranspiração de cultura, como o cultivo em sequeiro, a ET_{azul} será considerada zero. A P_{eff} foi determinada pelo software Cropwat 8.0.

A evapotranspiração da cultura foi definida pelo produto da evapotranspiração de referência (ET_0 , mm/dia) pelo coeficiente de cultura (K_c). O cálculo da evapotranspiração de referência foi determinado de acordo com a equação de Penman-Monteith (Equação 11), a qual é utilizada pela FAO (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (11)$$

Em que: ET_0 = evapotranspiração de referência (mm/dia); Rn = saldo de radiação na superfície das culturas ($MJ m^2/dia$); G = fluxo de calor no solo ($MJ m^2/dia$); T = média diária da temperatura do ar ($^{\circ}C$); u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura (m/s); e_s = pressão da saturação de vapor (kPa); e_a = pressão real de vapor (kPa); $e_s - e_a$ = déficit de saturação de

vapor (kPa); Δ = declinação da curva de saturação de vapor da água (kPa/°C); γ = fator psicrométrico (kPa/°C).

Os dados para a determinação da evapotranspiração de referência foram obtidos na PCD (Plataforma de Coleta de Dados), localizada na própria usina, e próximo ao talhão que foi a área de experimento, considerando as médias mensais, a partir dos valores diários. Quanto ao coeficiente de cultura utilizou-se os valores médios obtidos por Silva et al. (2014) de 0,56; 0,65; 1,43 e 1,32, para os estádios inicial, desenvolvimento, média e final .

3.4.2 Pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar

Determinou-se a contabilização da pegada hídrica cinza para o cultivo de cana-de-açúcar, em relação a cada agrotóxico utilizado, a partir da Equação 12. A PH_{cinza} , em m^3 , considera a carga de poluente (L, em t) dividida pela diferença entre a qualidade de água padrão em seu estado natural, ou seja, a concentração máxima aceitável (C_{max} , em t/m^3), e a concentração natural no corpo hídrico (C_{nat} , em t/m^3):

$$PH_{cinza} = \frac{\left(\frac{L}{C_{max} - C_{min}} \right)}{P} = \frac{\left(\frac{\alpha \times TAQ}{C_{max} - C_{min}} \right)}{P} \quad (12)$$

Em que: α é o fator adimensional que representa a fração de lixiviação/escoamento, ou seja, é a fração das substâncias químicas que chegam aos corpos d'água. TAQ = taxa de aplicação por hectare dos agrotóxicos no campo (t/ha); P = produtividade da cultura (t/ha).

A taxa de aplicação (TAQ) dos agrotóxicos corresponde a taxa de aplicação do produto em campo, multiplicado pela concentração do produto e pela quantidade de vezes aplicado.

A concentração máxima permitida (C_{max}) seguiu as normas da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe II. Outras resoluções internacionais foram utilizadas para a determinação da C_{max} , tais como a legislação da União Europeia (EU, 2013), Estados Unidos (EPA, 1989), Canadá (CCME, 2013) pois de acordo com Franke et al. (2013), estas normas estão atualizadas e são cientificamente confiáveis, empregou-se também normas da

França (INERIS, 2015). A concentração natural ($C_{nat} = 0 \mu\text{g/L}$, uma vez que os pesticidas não ocorrem naturalmente).

Quanto a fração de lixiviação/escoamento (α) foi determinada para cada agrotóxico, de acordo com a metodologia de Franke et al. (2013). Os dados utilizados para os cálculos da fração foram extraídos do PPDB (2018). No caso da cana-de-açúcar, a poluição é difusa sendo assim, dependerá da fração dos agrotóxicos aplicados no campo e que chegarão ao sistema de água. Dessarte, deve-se calcular a fração de lixiviação/escoamento (α), adimensional, a qual foi determinada pela Equação 13:

$$\alpha = \alpha_{min} + \left[\frac{\sum_i S_i \times W_i}{\sum_i W_i} \right] \times (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \quad (13)$$

Em que: α_{min} = fração de lixiviação-vazão mínima; α_{max} = fração de lixiviação-vazão máxima; S_i = potencial de lixiviação-escoamento; W_i = peso do fator.

Para o cálculo da fração de lixiviação/escoamento, considerou as frações de lixiviação máxima e mínima igual a 0,1 e 0,0001, respectivamente, de acordo com Franke et al. (2013). O potencial (S_i) e o peso (W_i) foram determinados de acordo com cada fator e para cada agrotóxico, Tabela 8:

Tabela 8: Fatores que influenciam o potencial da vazão de lixiviação dos agrotóxicos. O estado do fator que determina o potencial de lixiviação e escoamento é expresso como um valor entre 0 e 1

		Agrotóxicos				
Categoria	Fator	Potencial de lixiviação e escoamento	Muito baixo	Baixo	Alto	Muito alto
		Valor (S)→	0,00	0,33	0,67	1,00
		Peso (w)↓				
Propriedades químicas	K_{oc} (L.kg ⁻¹)	20	>1000	1000-200	200-50	<50
	PL (D _{T50} em dias)	15	<10	10-30	30-100	>100
	PE (D _{T50} em dias)	10	<10	10-30	30-100	>100

...continua

		...continuação						
Fatores ambientais	Solo	TSL	15	Argila	Silte	Franco	Areia	
		TSE	10	Areia	Franco	Silte	Argila	
		Conteúdo de MO*(dag. Kg ⁻¹)	10	>7,00	7,00	4,01-4,00	2,01-2,00	Baixo
		IP (mm)	5	Baixa	Moderada	Alta	Muita alta	
	Clima	P (mm)	5	>600	600-1200	1200-1800	>1800	
Práticas culturais	PM	10	Ótima	Boa	Ruim	Péssima		

Fonte: (Adaptado de Franke et al., 2013) K_{oc}=Coeficiente de partição de carbono orgânico do complexo solo-água; PL= Persistência relevante a lixiviação (50% do tempo de duração); PE= Persistência relevante ao escoamento (50% do tempo de duração); IP=Intensidade da precipitação; TSL= Textura do solo relevante a lixiviação; TSE= Textura do solo relevante ao escoamento; P=Precipitação; PM=Práticas de manejo relevante para o escoamento.

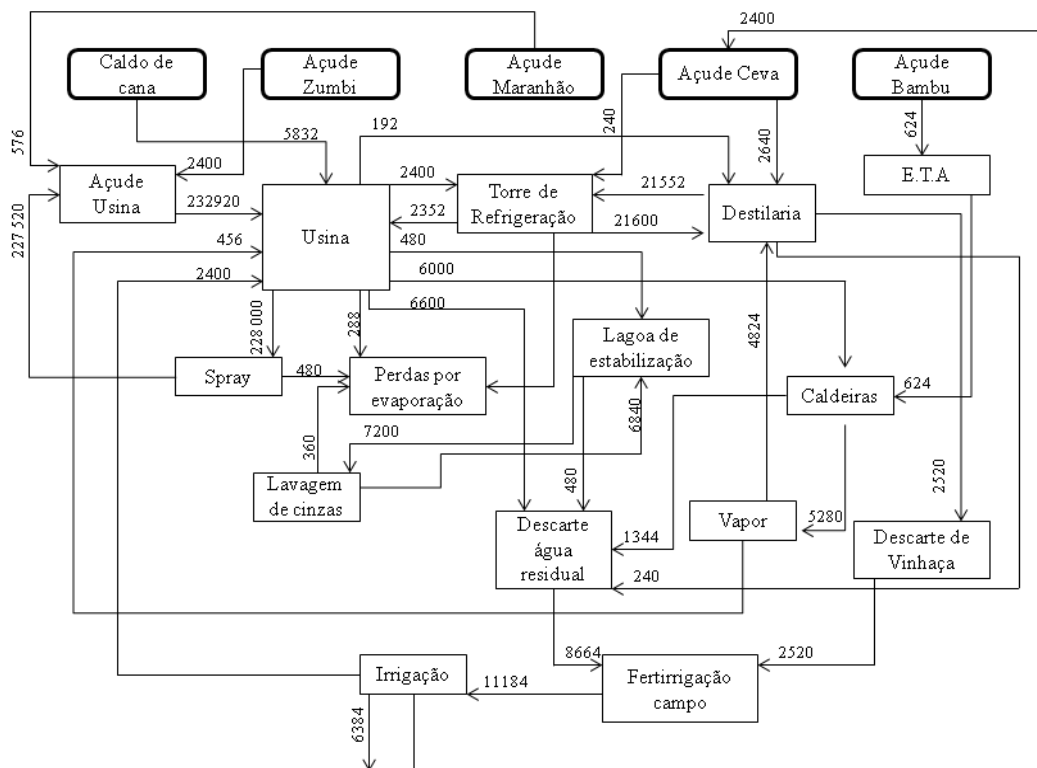
De acordo com Hoekstra et al. (2011), quando um fluxo de efluente envolve mais de uma forma de poluente, a PH cinza será determinada com base no poluente mais crítico. Portanto, o cálculo da PH cinza da cana-de-açúcar selecionou o agrotóxico que obteve a maior PH cinza, em m³/ha, durante o ciclo e dividiu-se pela produtividade da cana-de-açúcar t/ha.

3.4.3 Pegada hídrica no processo de fabricação do etanol e açúcar .

Segundo Hoekstra et al. (2011), a PH de um produto é definida como o volume total de água doce que é utilizada direta ou indiretamente em seu processo produtivo. Portanto, é fundamental entender como é produzido e o volume de água utilizado nos processos.

O abastecimento hídrico da usina, para o processo de fabricação do etanol e açúcar é realizado por 4 açudes, sendo eles: Zumbi, Maranhão, Ceva e Bambu. Os volumes de água retirados dos mesmos são: 2400, 576, 2880 e 624 m³.dia⁻¹, totalizando 6480 m³.dia⁻¹. A distribuição da água segue o fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5: Fluxograma da utilização da água na usina, com valores em m³/dia.



Fonte: Elaboração própria (2019).

A PH no processo de fabricação do etanol e do açúcar, corresponde as Equações 14 e 15 respectivamente:

$$PH_{\text{fabricação do etanol}} = \frac{\text{Volume consumido de água (L água.dia}^{-1}\text{)}}{\text{Volume produzido de etanol (L etanol.dia}^{-1}\text{)}} \quad (14)$$

$$PH_{\text{fabricação do açúcar}} = \frac{\text{Volume consumido de água (m}^3\text{ água.dia}^{-1}\text{)}}{\text{Massa de açúcar (t açúcar.dia}^{-1}\text{)}} \quad (15)$$

O resultado para a PH da fabricação do etanol pôde ser representado também através do consumo em (m³ água/t de etanol), utilizando-se 0,789 kg/L como a densidade do produto.

De acordo com dados fornecidos pela usina, para a primeira e segunda safra, respectivamente, o rendimento médio do etanol, em L de etanol por tonelada de cana-de-açúcar, foi 86,82 e 79,45; e para o açúcar, em kg de açúcar por tonelada de cana-de-açúcar, foi 141,53 e 132,44. Conforme a mesma fonte, por dia se esmaga 10 mil toneladas de cana-de-açúcar.

Com essas informações fornecidas pela usina, encontra-se o volume de etanol e de massa de açúcar produzidos por dia, através da multiplicação do rendimento médio e a massa de cana-de-açúcar que é esmagada por dia.

A pegada hídrica dos produtos resultantes na usina é representada apenas pela PH azul. Não considerou a PH verde, pois essa se refere ao consumo de água de chuva, que não tem dentro da usina. Também não se analisou a PH cinza, pois o descarte de água residual e de vinhaça são utilizados na fertirrigação da cana-de-açúcar, como se deve contabilizar apenas o poluente mais crítico, o agrotóxico portanto, foi o único poluente avaliado.

3.4.4 Pegada hídrica dos produtos etanol e açúcar.

O cálculo da pegada hídrica dos produtos gerados, etanol e açúcar, foi realizado de acordo com a metodologia de Hoekstra et al. (2011), seguindo o método sequencial cumulativo, pois o mesmo é mais adequado quando um processo resulta em vários produtos (Equação 16)

$$PH_{prod}[p] = \left(PH_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{PH_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) * f_v [p] \quad (16)$$

Em que: $PH_{prod}[p]$ = pegada hídrica do produto final "p" (volume/massa); $PH_{prod}[i]$ = pegada hídrica do insumo "i"; $PH_{proc}[p]$ = pegada hídrica do processamento que transforma os "y" insumos em "z" produtos, com base no uso da água por unidade de produto processado "p" (volume/massa); f_p = fração do produto de um produto final e f_v = fração de valor de um produto final.

A fração de produto é equivalente a Equação 17:

$$f_p[p, i] = \frac{peso [p]}{peso [i]} \quad (17)$$

Sendo portanto, o peso do produto sobre o peso do insumo (cana-de-açúcar), ou seja, o rendimento médio do produto. A fração de valor é a razão entre o valor de mercado desse produto e o valor de mercado agregado de todos os produtos finais. De acordo com Gerbens-Leens e Hoekstra (2009), para o etanol o f_v é 0,89 e para o açúcar é 0,87.

3.5 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Para determinar os dados utilizados na sustentabilidade verde, como a área de vegetação natural, área urbana e espelho de água, fez-se necessário o mapeamento do uso e ocupação do solo. Classificou-se as áreas de acordo com a Tabela 9, aplicando-se o IVDN (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para identifica-las.

Tabela 9: Agrupamento das áreas para uso e ocupação do solo.

Áreas	Classes de uso e ocupação do solo
Agrícola	Agricultura irrigada ou sequeira
Urbana	Edificações e ruas
Mata Atlântica	Floresta e Vegetação alterada
Água	Espelho d'água
Solo exposto	Afloramento rochoso, áreas desmatadas

Fonte: Elaboração própria.

O IVDN foi proposto por Rouse et al. (1973) e é aplicado em diferentes estudos, tais como florestas, áreas agrícolas e dados climáticos (LIU, 1989; LOURENÇO; LANDIM, 2004). Seus valores vão de uma escala de - 1 a +1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior é a densidade de cobertura vegetal (Rizzi, 2004).

O mapa de uso e ocupação foi viabilizado através de imagens do satélite LANDSAT 8, sensor OLI (Operational Land Imager), órbita (214) e ponto (65) de (28/07/2013), disponibilizada pelo site do USGS e CPRM. Para a escolha do tempo da imagem, considerou-se a ausência de nuvens e sombras. No ano da imagem, a precipitação acumulada no município de São Vicente Férrer (nascente do rio Capibaribe Mirim) foi 1436mm e em Goiana (foz do rio) 1464,1mm (APAC, 2014). A média climatológica para o mês de julho em São Vicente Férrer é 171,48mm, e o acumulo para o mês em 2013 foi 268,9mm; já em Goiana, a média para o mesmo mês é 319mm e o acumulado foi 325mm (APAC, Julho de 2013). Para um dia antes, 26/07/2013, alguns pontos obtiveram resultados diferentes, em São Vicente Férrer (0mm) e Goiana (4,2mm) (APAC, Boletim diário, 2013).

O IVDN é um índice relacionado com a densidade da vegetação, e foi obtido pela Equação 18, (ROUSE et al., 1973). Sendo as bandas 5 e 4, correspondendo ao espectro infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

$$IVDN = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (18)$$

Em que: NIR (reflectância da banda do infravermelho próximo); RED (reflectância da banda do vermelho).

3.6 Fase III: Avaliação da sustentabilidade ambiental da pegada hídrica na sub-bacia.

A avaliação da sustentabilidade ambiental da pegada hídrica tem o objetivo de comparar a pegada hídrica dos seres humanos com o que a Terra pode sustentar (HOEKSTRA et al., 2011). Portanto, essa oferta e demanda pode ser analisada por dimensões distintas como ambiental, social e econômica.

A pegada hídrica em uma determinada bacia será insustentável, do ponto de vista ambiental, quando as demandas de vazões ambientais ou os padrões de qualidade da água em estado natural estiverem comprometidos, ou seja, as demandas são desrespeitadas e/ou a poluição excede a capacidade do corpo d'água assimilar os efluentes. Portanto, quando os indicadores de sustentabilidade ambiental da PH, que são: a escassez de água verde (EA_{verde}), escassez de água azul (EA_{azul}) e o nível de poluição da água (NPA) ultrapassam o valor de 100%, a bacia é considerada insustentável (HOEKSTRA et al., 2011).

Após os cálculos de pegada hídrica da cana-de-açúcar, cultivada na usina Olho D'Água, objetivou-se analisar a sustentabilidade ambiental da PH, na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.

Para a sustentabilidade da sub-bacia, considerou-se as sustentabilidades das componentes verde, azul e cinza, em uma dimensão ambiental e estabeleceu alguns pontos como: períodos seco, chuvoso, mensal e safra completa, correspondentes as safras 2016/2017, 2017/2018 e para uma série histórica (2000-2017).

Hoekstra et al. (2011), determinam um ponto crítico como sendo um período específico do ano, como o período de seca, em que uma sub-bacia tem sua PH insustentável. Conforme Nóbrega et al. (2015), na região Metropolitana, Zona da Mata e Agreste de Pernambuco, as chuvas são menos volumosas durante a primavera e verão, ou seja, entre os meses de setembro a fevereiro; enquanto as chuvas são mais volumosas durante o outono e inverno, ou seja, de março a agosto. Diante disto, adotou-se como período seco os meses com menor volume de precipitação, e período chuvoso os meses com maior volume de chuva.

Analisou-se também a sustentabilidade ambiental, para o período seco e chuvoso, considerando a vazão de uma série histórica de 2000 a 2017, para as componentes azul e

cinza, uma vez que a escolha da análise de apenas duas safras pode superestimar ou subestimar a sustentabilidade ao longo do tempo. Não se analisou a sustentabilidade ambiental da série histórica de 2000 a 2017 para a componente verde por indisponibilidade de dados para o cálculo de evapotranspiração.

Nas fórmulas de escassez de água azul e nível de poluição de água, utilizou-se vazões. Para converter m^3/s das vazões para m^3 , multiplicou-se, pela quantidade de dias de cada safra vezes $24\text{h} \times 60\text{min} \times 60\text{s}$. Sendo a primeira safra 413 dias e a segunda 325, e para série histórica considerou a média.

Quanto aos períodos estudados (seco e chuvoso) considerou a PH total da safra (m^3/t) vezes a produção total (t), dividido pela disponibilidade de água. Para a disponibilidade verde, tomou o somatório da evapotranspiração para os meses secos e chuvosos, vezes as áreas (total da bacia, reserva natural e improdutiva). Para a disponibilidade de água azul (vazão mais o somatório da PH azul menos a demanda de vazão ambiental) considerou as médias das vazões reais, as quais foram separadas em máxima, mínima e média dos meses secos (setembro a fevereiro) e chuvosos (março a agosto). A vazão real para o NPA foi semelhante a vazão real determinada na disponibilidade de água azul.

No ponto estudado (mensal), para a EA azul e verde considerou o produto da PH mensal da cana-de-açúcar (m^3/t) pela produção total (t), dividido pela disponibilidade de água para o respectivo mês. Lembrando-se que a disponibilidade de água verde foi a evapotranspiração mensal multiplicado pelas respectivas área, e a disponibilidade azul foi a vazão mensal mais a PH do mês menos a demanda de vazão ambiental mensal. No caso da EA_{azul}, somou-se também PH mensal da cana com a PH do processo de fabricação do etanol e açúcar.

O NPA não foi determinado mensalmente, uma vez que a PH cinza não é calculada mês a mês, pois os agrotóxicos utilizados permanece com seus efeitos mesmo depois de sua aplicação. Portanto, é inviável o cálculo da PH cinza por mês e conseqüentemente o NPA.

Para o período estudado (safra completa), analisou a PH total (m^3/t) vezes a produção total (t), dividido pela disponibilidade de água para a safra completa. Sendo a disponibilidade verde o somatório da evapotranspiração de toda a safra vezes as áreas. A disponibilidade azul foi média das vazões médias mensais, menos a PH azul total e a demanda de vazão ambiental para toda safra. E a vazão real, para o NPA, igual a média da vazão média mensal.

3.6.1 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica verde dentro da sub-bacia hidrográfica

A avaliação da sustentabilidade da componente verde foi realizada por meio do indicador escassez de água verde (EA_{verde}), sendo que resultados acima de 100% não é sustentável, pois significa que a água verde foi totalmente consumida (Equação 19).

$$EA_{verde} [x, t] = \frac{\sum PH_{verde}[x, t]}{DA_{verde}[x, t]} \quad (19)$$

O somatório da pegada hídrica verde corresponde a PH verde da cana-de-açúcar, calculada anteriormente. A disponibilidade de água verde (DA_{verde}) em uma bacia x em um determinado período t é definida como a evapotranspiração total da água da chuva (ET_{verde}) menos a soma da evapotranspiração reservada para a vegetação natural (ET_{amb}) e da evapotranspiração das áreas não produtivas (ET_{improd}) (HOEKSTRA et al., 2011), conforme equação:

$$DA_{verde} [x, t] = ET_{verde}[x, t] - ET_{amb}[x, t] - ET_{improd}[x, t] \quad (20)$$

A ET_{verde} é a área da sub-bacia multiplicada pela evapotranspiração anual para a safra correspondente. A ET_{amb} equivale-se a área de vegetação natural multiplicada pela evapotranspiração anual. Por fim a ET_{improd} representada pela área urbana mais espelhos de água multiplicado pela evapotranspiração anual.

3.6.2 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica azul dentro da sub-bacia hidrográfica

A sustentabilidade ambiental da PH azul corresponde a relação da PH azul com a disponibilidade de água azul na sub-bacia. A mesma é insustentável do ponto de vista ambiental quando a PH azul excede a disponibilidade. O indicador de escassez de água azul (EA_{azul}) foi determinada de acordo com a Equação 21:

$$EA_{azul} = \frac{\sum PH_{azul}[x,t]}{DA_{azul}[x,t]} \quad [21]$$

O somatório da pegada hídrica azul dentro da sub-bacia em determinado tempo, é representada pela PH azul da cana-de-açúcar mais a PH azul no processo de fabricação do etanol e açúcar.

De acordo com Hoekstra et al. (2011) a disponibilidade de água azul (DA_{azul}) pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$DA_{azul} = Q_{nat}[x, t] - DVA[x, t] \quad [\text{volume/tempo}] \quad (22)$$

O escoamento natural (Q_{nat}) da bacia é igual a quantidade total de fluxos de água superficiais e subterrâneas, o mesmo é calculado como o somatório do escoamento real, mais a PH azul da bacia (HOEKSTRA et al., 2011). Considerando, para este trabalho, a PH azul da cana-de-açúcar e mais a PH azul do processo de fabricação do etanol e açúcar.

Portanto para o presente trabalho, utilizou-se os dados de escoamento real -vazão (Apêndice A) disponibilizados pelo portal HidroWeb da ANA (Agência Nacional das Águas). A estação fluviométrica selecionada foi a Caricé, código 39084000, pertencente ao Rio Capibaribe Mirim, com Latitude: S 7° 32' 34.08" e Longitude: W 35° 4' 6.96", sua escolha foi devido a aproximação ao exutório da sub-bacia, e sobretudo, ao fornecimento de dados completos.

A demanda de vazão ambiental (DVA) deve ser definida para a quantidade e para o período das vazões necessárias as quais sustentarão as necessidades de água doce dos ecossistemas e das comunidades locais que dependem desse recurso (HOEKSTRA et al., 2011). A mesma foi calculada de acordo com Benetti et al. (2003) esses autores apresentam que para Pernambuco a vazão ambiental corresponde a 20% da Q_{90} , uma vez que para a outorga permite 80% da vazão referencial (Q_{90}) quando não houver barramento ou quando houver barramento os cursos d'água devem ser perenes.

A Q_{90} representa a probabilidade de 90% do tempo das vazões serem igualadas ou superadas. A mesma foi determinada, como descrito em Tomaz (2007), através do método de análise de frequência, dispondo todas as vazões médias de série histórica de 2000 a 2017 em ordem decrescente, em seguida calculando a probabilidade (P) de 90% para uma certa vazão que será igualada ou superada de acordo com a Equação 23:

$$P = 100 x \frac{m}{(n+1)} \quad (23)$$

Em que: m = é a ordem da vazão; n = número total de dados.

Para determinar a vazão exata de Q_{90} , interpolou-se as vazões com valor logo a abaixo e o valor sucessivamente superior a Q_{90} , de acordo com a tabela resultante do Apêndice B.

3.6.3 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica cinza dentro da sub-bacia hidrográfica

Outro indicador de sustentabilidade é o nível de poluição da água (NPA) em uma bacia, por medir o grau de poluição. Ele é definido como a fração consumida da capacidade de assimilação de efluentes e é calculado pela razão entre o total das pegadas hídricas cinza (ΣPH_{cinza}) e o escoamento real de uma bacia (Q_{real}) (Apêndice A) conforme Equação 24 (HOEKSTRA et al., 2011):

$$NPA[x, t] = \frac{\Sigma PH_{cinza} [x,t]}{Q_{real}[x,t]} \quad (24)$$

A PH_{cinza} dependerá do escoamento disponível na bacia para assimilar os efluentes. A avaliação da PH_{cinza} é considerada um ponto crítico e será insustentável quando a capacidade de assimilação dos poluentes já foi totalmente consumida, violando os padrões da água em seu estado natural para determinado período e bacia, ou seja, quando o NPA exceder 100%.

3.7 Fase IV: Formulação de respostas para redução da pegada hídrica

A última fase de uma avaliação completa da pegada hídrica consiste em formular respostas para reduzi a PH. Alguns pontos são fundamentais a serem considerados na prioridade da redução da PH, como os pontos críticos (período seco) e não críticos (período chuvoso) (Tabela 10)

Tabela 10: Prioridades na redução da pegada hídrica.

	Período chuvoso (Março a Agosto)	Período seco (Setembro a Fevereiro)
Baixo potencial de redução	0	+
Alto potencial de redução	+	++

Fonte: Adaptado de Hoekstra et al. (2011)

Portanto, as medidas foram priorizadas para o período seco e sobretudo, para as pegadas hídricas que obtiveram resultados insustentáveis nas safras (2016/2017; 2017/2018) ou na série histórica (2000 a 2017).

De acordo com Freitas e Chaves (2014), a formulação de resposta é uma composição de um inventário de ações que podem colaborar para a redução da pegada hídrica, as quais dependerão da avaliação e resultados dos processos anteriores. Quando há insustentabilidade ambiental, a formulação de resposta considerará ações de controle e redução da PH, e quando sustentável as ações são de manutenção.

É importante resaltar também a execução de um planejamento coerente com a disponibilidade de água ao período correspondente. Em algumas situações a redução da PH torna-se inviável, sendo mais apropriado a programação da realização de certas atividades no momento de maior disponibilidade hídrica.

3.8 Análise dos poluentes

A análise de cada agrotóxico utilizado é importante para possíveis substituições em outras safras. Na investigação da sustentabilidade ambiental, usa-se apenas o poluente mais crítico nos cálculos. Porém na análise dos poluentes, todas as substâncias serão analisadas de acordo com seu nível de poluição de água (NPA), descrito na Equação 23.

A PH cinza de cada agrotóxico será de acordo com metodologia proposta por Franke et al. (2013), descrita no tópico 3.4.2. (Pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar). Já o escoamento real (Q_{real}), em m^3/s , será utilizada a média das vazões para o ciclo completo, no caso 6,96 e 5,64 m^3/s , primeira e segunda safra, na ordem.

Os resultados segue o mesmo principio da sustentabilidade ambiental da componente cinza, os quais valores acima de 100% são insustentáveis.

Outra análise, além do NPA, foi a classificação quanto a toxicidade ao ser humano e a periculosidade ambiental dos agrotóxicos, de acordo com a portaria N° 03/92 do Ministério da Saúde e N° 84/96 do IBAMA, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

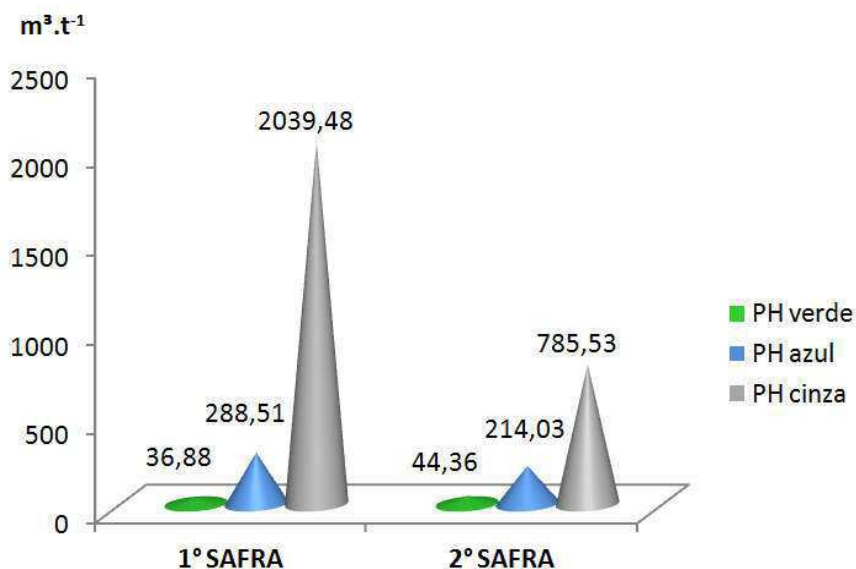
Os resultados apresentados correspondem aos valores de pegada hídrica da cana-de-açúcar, do processo de fabricação, e dos produtos (etanol e açúcar). Destacou-se a PH cinza da cana-de-açúcar, uma vez que outros trabalhos não contabilizaram os efeitos dos agrotóxicos, apenas consideraram os poluentes menos críticos, como o nitrogênio encontrado em fertilizantes.

Após os cálculos de PH, executou-se o mapeamento do uso e ocupação do solo, afim de inserir os dados na análise de sustentabilidade ambiental da PH, a qual foi avaliada através dos indicadores de escassez de água (EA) verde e azul e pelo nível de poluição da água (NPA). Os períodos investigados dessa sustentabilidade foram: seco, chuvoso, mensal e safra completa. Com os resultados dos indicadores foram propostas formulações para a redução da PH e conseqüentemente tornar mais sustentável cada componente (verde, azul e cinza). Por fim, realizou-se a análise dos poluentes aplicados em cada safra, para caracterizá-los quanto ao NPA e a classificação de toxicidade ao ser humano e periculosidade ao meio ambiente.

4.1 PH verde, azul e cinza da cana-de-açúcar

Os resultados encontrados para a evapotranspiração e precipitação total para a primeira safra (2016/2017) foram, respectivamente, 2664,94 mm e 889,80 mm; enquanto para a segunda safra (2017/2018) foram 2032,07 mm e 884,20 mm. Quanto aos valores das componentes da pegada hídrica da cana-de-açúcar, em m^3/t , encontram-se no Gráfico 3. Observa-se que a primeira safra obteve uma PH total maior, equivalente a 2364,87 m^3/t , quando comparada a segunda safra, com 1043,92 m^3/t^1 .

Gráfico 3: Pegada hídrica verde, azul e cinza para a cana-de-açúcar, em m^3/t , na 1° e 2° safra.

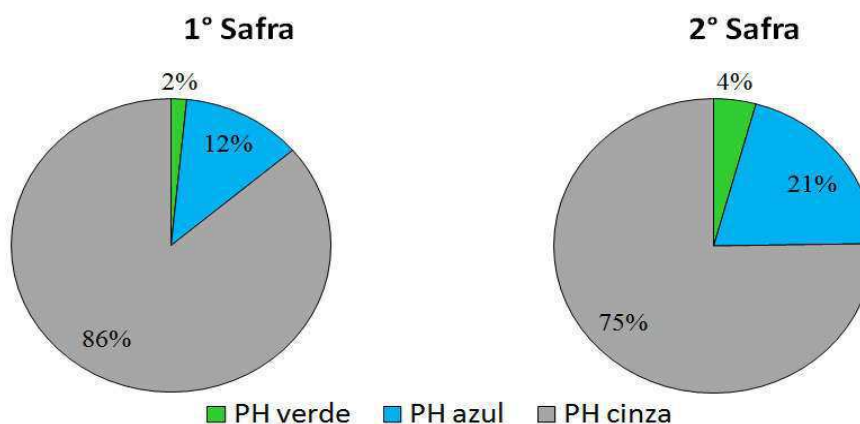


Fonte: Elaboração própria (2019).

A PH total da cana-de-açúcar foi reduzida em 55,86% da 1° para 2° safra. Na primeira safra, o tempo de cultivo mais prolongado, a evapotranspiração elevada e a precipitação praticamente equivalente a segunda safra, essas características, resultaram em um consumo maior de água azul, quando comparado a safra 2017/2018, portanto, maior a PH azul da cana-de-açúcar. Hoekstra et al. (2011) declaram que o consumo de água azul está relacionado a perda de água por evaporação, ou quando a água retorna a outra bacia ou ao mar ou ainda é adicionada ao produto. Outro fator determinante para a redução da PH, da segunda safra, foi a componente cinza, a qual foi representada pelos efeitos dos diferentes agrotóxicos utilizados, e obteve grande influência no valor da PH total.

A contribuição de cada componente da PH da cana-de-açúcar é exibida no Gráfico 4. Observa-se neste gráfico o quanto a agroindústria canavieira contribuiu para a poluição hídrica, necessitando de um volume de água maior para a diluição de poluentes, quando comparado ao consumo de água para irrigação.

Gráfico 4: Contribuição da pegada hídrica verde, azul e cinza para a cana-de-açúcar, em m³/t, na 1^o e 2^o safra.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Entre as componentes verde e azul, excluindo-se a cinza, a PH azul foi mais significativa, nas duas safras. Alguns autores como Scholten (2009) para média global; Kongboon e Sampattagul (2012) para a região de Lampang; e Silva et al. (2015), na Paraíba com irrigação a 100% da evapotranspiração também encontraram proporções maiores para a PH azul em relação a PH verde (Tabela 11). Entretanto, quanto a PH cinza, todos os autores, exceto Jorrat et al. (2018), não contabilizaram os efeitos dos agrotóxicos, apenas as ações de lixiviação de nitrogênio pelo uso de fertilizantes, e portanto, subestimaram a parcela de contribuição dessa componente. Jorrat et al. (2018) obtiveram uma contribuição de 88% da PH cinza para cultivo de cana-de-açúcar (Tabela 11), corroborando com o resultado calculado no presente estudo (Gráfico 4).

A variabilidade da PH será influenciada por culturas, estações e regiões (SILVA et al., 2016; GOBIN et al., 2017). A PH de um produto depende de alguns aspectos, tais como suas condições de produção, incluindo a eficiência no uso da água, o local e a época da produção. Silva et al. (2016) mostram que a escassez de água, a pegada hídrica das lavouras e a produção para exportação variam muito entre as regiões do Brasil. Portanto, as pesquisas apresentarão resultados diferentes de PH para determinado produto cultivado em diversas localidades. A Tabela 11 apresenta os valores das componentes da PH de acordo com alguns autores para regiões diversas regiões

Tabela 11: Comparação das componentes da pegada hídrica da cana-de-açúcar para diferentes autores em m³/t e suas respectivas contribuições em %.

Autores	Localização	PH verde	% verde	PH azul	% azul	PH cinza	% cinza	Total
Scholten (2009)	Média global Brasil	109	44,7	121	49,8	14	5,7	243
Mekonnen e Hoekstra (2011)	Média global	139	66,5	57	27,3	13	6,2	209
Kongboon e Sampattagul (2012)	Média da Tailândia Lampang	90	44,6	87	43,1	25	12,4	202
Scarpate et al. (2015)	São Paulo	145	72,1	38	18,9	18	9	201
Silva et al. (2015)	Paraíba - com o modelo Cropwat Paraíba - irrigação a 100% da ET	120	50,8	107	45,3	9	3,8	236
Toledo et al. (2015)	Alagoas	303	71,3	90	21,2	32	7,5	425
Santiago et al. (2017)	Alagoas	105	57,7	6	3,3	71	39	182
Jorrat et al. (2018)	Tucumán, Argentina	89	11,2	0	0	703	88,8	792

Fonte: Elaboração própria (2019).

A PH verde e azul, dos autores, foram maiores e menores, respectivamente, quando comparadas ao presente estudo. Isso se deve, principalmente, as características climáticas de cada localidade. Outro fator determinante na diferença de valores é o coeficiente de cultivo utilizado no cálculo. Mekonnen e Hoekstra (2011), utilizaram o k_c proposto por Chapagain e Hoekstra 2004; Kongboon e Sampattagul (2012) usaram do Royal Irrigation Department 2010; Scarpate et al. (2015) foi Hernandez et al. 2013; e Toledo et al. (2015) empregaram o k_c de Doorembos e Kassam 1994, os demais autores não especificaram o k_c .

No presente estudo, utilizando-se o k_c médio proposto por Doorembos e Kassam (1979), de acordo com a Tabela 2, encontram-se valores diferentes de PH. Para a primeira e segunda safra, a PH verde e azul, passam a ser, respectivamente, em m³/t, 32,19; 222,18; 39,91 e 180,61, ou seja, subestima os valores encontrados de acordo com o k_c proposto por Silva et al. (2014). Por este motivo, considerou mais adequado para a presente pesquisa, o k_c proposto por Silva et al. (2014) uma vez que as características climáticas da região são semelhantes.

Quanto a PH cinza, os valores encontrados para as safras foram superiores aos determinados pelos autores da Tabela 11, justamente pela grande maioria deles, terem como foco na contabilização da PH cinza, apenas os efeitos do Nitrogênio (N) encontrado em

fertilizantes. Poucos trabalhos contabilizam os efeitos dos agrotóxicos usados no campo. Matos et al. (2017), em pesquisa com cebola, identificaram uma PH cinza de 75078,8 m³/t, na região semiárida do Brasil, para o agrotóxico Dicarzol 500PS. Boff (2016) encontrou para o cultivo de soja uma PH cinza de 2441 a 7651 m³/t, destacando-se o poluente 2,4-D.

A PH total, dos autores, foi inferior ao encontrado neste trabalho, reflexo da PH cinza. Considerando 21% , como a porcentagem de N no fertilizante, 18,42 ha a área de aplicação e analisando apenas o uso de nitrogênio, ter-se-ia, para as safras as seguintes PHs cinzas, de acordo com a Tabela 12:

Tabela 12: Cálculo da pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar, considerando apenas o nitrogênio.

Safra	Taxa média de aplicação de fertilizante	Quantidade de N aplicado	Total de N aplicado	Lixiviação ou escoamento de N nos corpos de água 10%	con. Máx	PH cinza total	Produção	PH cinza da cana-de-açúcar
	(kg/ha)	(kg/ha)	(t/ ano)	(t/ano)	(mg/L)	(m ³ /ano)	(t)	(m ³ /t)
I	499,45	104,89	1,93	0,19	10	19319,86	1801,21	10,73
II	436,72	91,71	1,69	0,17	10	16893,36	1676,72	10,08

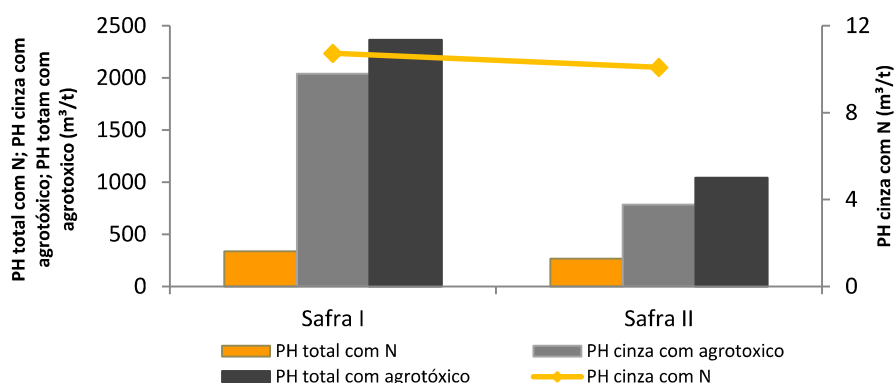
Fonte: Elaboração própria (2019)

Atribuiu-se o valor de 10% para a fração de lixiviação, como proposto por Van Oel et al. (2008); Babel et al. (2011), ou seja, apenas 10% do total de nitrogênio aplicado atinge a superfície da água. Para a concentração máxima aceitável do fertilizante nitrogenado, seguiu as normas brasileiras, que de acordo com a Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio ambiente (CONAMA), para a classe 3 de água doce o limite aceitável é 10mg/L, ou 10⁻⁵ t/m³. Quanto a concentração natural do poluente no corpo hídrico assumiu o valor zero, por não haver avaliações quanto a concentração de N.

Os valores de PH cinza, considerando apenas o N, é próximo de 10 m³/t, para as duas safras. Esse resultado corrobora com os mesmos determinados pelos autores da Tabela 11. Utilizando-se os valores de PH verde e azul (Gráfico 3), de acordo com o k_c segundo Silva et al. (2014), mais a PH cinza com base no Nitrogênio, tem-se a PH total de 336,12 e 268,47 m³/t, para a primeira e segunda safra respectivamente, valores próximos aos dados da literatura.

O aumento percentual do uso do agrotóxico, no lugar do nitrogênio, foi mais de 600 e 280%, na primeira e segunda safra, para pegada hídrica total; logo tanto a PH cinza como a PH total foi significativamente alterada (Gráfico 5).

Gráfico 5: Contribuição da PH cinza com nitrogênio e com agrotóxicos, na PH total, para as safras I e II.



Fonte: Elaboração própria (2019).

A contabilização da PH cinza apenas pelo uso de nitrogênio, reduz o resultado final da PH e, portanto, oculta a carga de poluição que de fato ocorre em campos agrícolas. Diante desta comprovação, para a avaliação da PH de cultivos é importante considerar, nos cálculos, os efeitos dos agrotóxicos, os quais são poluentes mais críticos quando comparados aos fertilizantes nitrogenados. Logo, nesta tese utilizou, no cálculo da PH cinza, os dados dos agrotóxicos.

Jorrat et al. (2018) quantificaram a PH cinza em cana-de-açúcar de acordo com os agrotóxicos (Tabela 11) e encontraram uma PH cinza de 703m³/t e 850m³/t, considerando apenas 40% e 50% da área de cultivo respectivamente, sendo o poluente mais crítico o Atrazina. Observa-se que a segunda safra, do presente estudo, com 785,53 m³/t, colaborou com os valores encontrado por Jorrat et al. (2018), enquanto a primeira safra, utilizando-se outras substâncias, foi superior. Esse comportamento demonstra que a depender do agrotóxico utilizado a PH cinza terá resultados diferentes, portanto é necessário avaliar a PH cinza de cada agrotóxico empregado no cultivo de cana-de-açúcar.

Os principais agrotóxicos utilizados no cultivo da cana-de-açúcar para as safras estudadas foram (Tabela 13).

Tabela 13: Agrotóxicos utilizados na safra I (2016/2017) e II (2017/2018) e suas características.

Classe	Agrotóxico	Nome comercial	Safra utilizado	Classificação	
				Classificação toxicológica	de periculosidade ambiental
Herbicida	2,4 - D Amina	Aminol 2,4-D	I e II	I	I
Herbicida	Ametrina	Gesapax 500FW	I e II	III	II
Herbicida	Dicloreto de Paraquate	Gramoxone 200	I e II	I*	II*
Herbicida	Diurum 468 + Hexazinona	Velpar k	I	III	II
Herbicida	Diurum 500	Diuron 50 SC	I	IV	II
Herbicida	Diurum 800	Karmex	I	III	II
Inseticida	Etiprole	Curbix	I	III	II
Herbicida	Glifosato	Glifosato 648 SC	I e II	II	III
Herbicida	Imazapique	Plateau	II	III	III
Herbicida	Isoxaflutol	Provence 750WG	I e II	I*	II*
Herbicida	Metribuzim 480	Sencor 480	I e II	II	II
Herbicida	Metribuzim 700	Unimark 700	II	II	II
Herbicida	MSMA	Vocalane 790	I	III	III
Herbicida	Picloram	Padron	II	I	II
Herbicida	Tebutiurum	Combine 500SC	I	III	III

Dados de classificação disponibilizados no site da Adapar (agência de defesa agropecuária do Paraná) e *Agrolink

Fonte: Elaboração própria (2019).

Quanto a taxa de aplicação comercial e a taxa de aplicação real empregada no campo, desses agrotóxicos, utilizados nas respectivas safras são apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Taxa de aplicação de agrotóxico (TAQ) utilizados na cultura de cana-de-açúcar para a safra 2016/2017.

Agrotóxico	Tapl	Unid.	CP	Unid.	NA	TAQ (t/ha)
1	2	3	4	5	6	7=(2x4x6)x10 ⁻⁶
2,4 D Amina	0,66		806		1	0,00053
Ametrina	1,97		500		1	0,00099
Dicloreto de Paraquate	0,87		200		1	0,00017
Diurrom 500	1,8		500		1	0,00090
Etiprole	1	(L ha ⁻¹)	200	(g L ⁻¹)	1	0,00020
Glifosato	2,64		648		1	0,00171
Metribuzim 480	1,68		480		1	0,00081
MSMA	1,48		790		1	0,00117
Tebutiurrom	1,51		500		1	0,00076
Diurrom 468	1,5		468		1	0,00070
Diurrom 800	1,15	(kg ha ⁻¹)	800	(g kg ⁻¹)	1	0,00092
Hexazinona	1,5		132		1	0,00020
Isoxaflutol	0,13		750		1	0,00010

Tapl = taxa de aplicação do produto comercial por área (dose média); unid. = unidade; CP = concentração do produto; NA = número de aplicações.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15: Taxa de aplicação de agrotóxico (TAQ) utilizados na cultura de cana-de-açúcar para a safra 2017/2018.

Agrotóxico	Tapl	Unid.	CP	Unid.	NA	TAQ (t/ha)
1	2	3	4	5	6	7=(2x4x6)x10 ⁻⁶
2,4 D Amina	0,79		806		1	0,00064
Ametrina	2,02		500		1	0,00101
Dicloreto de Paraquate	0,97	(L ha ⁻¹)	200	(g L ⁻¹)	1	0,00019
Glifosato	2,62		648		1	0,00170
Metribuzim 480	1,97		480		1	0,00095
Picloram	0,37		388		1	0,00014
Imazapique	0,17		700		1	0,00012
Isoxaflutol	0,13	(kg ha ⁻¹)	750	(g kg ⁻¹)	1	0,00010
Metribuzim 700	1,5		700		1	0,00105

Tapl = taxa de aplicação do produto comercial por área (dose média); unid. = unidade; CP = concentração do produto; NA = número de aplicações.

Fonte: Elaboração própria

De acordo com as tabelas acima, entre as substâncias, o herbicida Glifosato obteve a maior taxa de aplicação, com 0,00171 e 0,00170t/ha, para primeira e segunda safra, respectivamente. Esse agrotóxico é classificado como altamente tóxico (classe II) e perigoso ao meio ambiente (classe III), e segundo Orgeron et al. (2017) é comum a aplicação desse produto antes da colheita para melhorar os níveis de sacarose na cana-de-açúcar. Recentemente, em Agosto de 2018, essa substância foi alvo de grande polêmica no Brasil,

quando a Justiça Federal decidiu suspender o registro de novos agrotóxicos à base de Glifosato, argumentando a demora da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) na reavaliação toxicológica. Entretanto, o Tribunal Regional Federal da Primeira Região (TRF-1) derrubou a liminar confirmando os graves riscos a economia do país, caso houvesse a suspensão da comercialização, e também pelo motivo da não comprovação científica dos danos, dessa substância, à saúde humana, como sendo produto carcinogênico, e ao meio ambiente.

Para o cálculo da fração de lixiviação/escoamento, determinou-se primeiramente o potencial de lixiviação/escoamento (S) e o peso dos fatores (W) de acordo com Franke et al. (2013), Tabela 8 de material e métodos. Os resultados de S e W para cada agrotóxico são apresentados na Tabela 16 e 17.

Tabela 16: Potencial de lixiviação (S) e pesos (w), por agrotóxico, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo na safra 2016/2017.

CAS	Agrotóxico	K _{oc} (L/kg)	PL (dias)	PE (dias)	TSL	TSE	MO (dag/ kg)	IP	P (mm)	PM
	Peso(w) →	20	15	10	15	10	10	5	5	10
94-75-7	2,4-D	39,3	4,4	7,7	F	F	2,07	M	889,8	B
	Amina	1,00	0,00	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
834-12-8	Ametrina	316	37	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,33	0,67	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
1910-42-5	Dicloreto de Paraquate	10000	365	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,00	1,00	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
330-54-1	Diuron	813	75,5	8,8	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,33	0,67	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
181587-01-9	Etiprole	-	50	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,50	0,67	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
1071-83-6	Glifosato	1424	15	9,9	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,00	0,33	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
51235-04-02	Hexazinona	54	105	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,67	1,00	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
141112-29-0	Isoxaflutol	145	0,9	0,36	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,67	0,00	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
21087-64-9	Metribuzim	106	11,5	41	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,67	0,33	0,67	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
2163-80-6	MSMA	1676	200	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0	1	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
34014-18-1	Tebutirom	80	400	-	F	F	2,07	M	889,8	B
		0,67	1,00	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 17: Potencial de lixiviação (S) e pesos (w), por agrotóxico, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo na safra 2017/2018.

CAS	Agrotóxico	K _{oc} (L/kg)	PL (dias)	PE (dias)	TSL	TSE	MO (dag/ kg)	IP	P(mm)	PM
	Peso(w) →	20	15	10	15	10	10	5	5	10
94-75-7	2,4-D	39,3	4,4	7,7	F	F	2,07	M	884,2	B
	Amina	1,00	0,00	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
834-12-8	Ametrina	316	37	-	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,33	0,67	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
1910-42-5	Dicloreto de Paraquate	10000	365	-	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,00	1,00	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
1071-83-6	Glifosato	1424	15	9,9	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,00	0,33	0,00	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
104098-48-8	Imazapique	137	120	-	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,67	1,00	0,50	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
141112-29-0	Isoxaflutol	145	0,9	0,36	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,67	0	0	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
21087-64-9	Metribuzim	106	11,5	41	F	F	2,07	M	884,2	B
		0,67	0,33	0,67	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33
01/02/1918	Picloram	13	82,8	80,8	F	F	2,07	M	884,2	B
		1	0,67	0,67	0,67	0,33	0,67	0,33	0,33	0,33

Fonte: Elaboração própria (2019)

Entre os principais fatores que influenciam o potencial de lixiviação/escoamento de agrotóxicos estão as propriedades das substâncias, os aspectos ambientais e as práticas agrícolas. Quanto as propriedades químicas, os dados das tabelas 16 e 17, apontam que o Dicloreto de paraquate foi o agrotóxico com maior coeficiente de partição de carbono orgânico, ou seja, seu potencial de lixiviação-escoamento foi o menor, apresentando portanto, uma menor mobilidade no perfil do solo. De acordo com Farran e Chentouf (2000) a matéria orgânica é uma das principais fontes que afetam a sorção e conseqüentemente a lixiviação de agrotóxicos. Quanto a persistência de um princípio ativo de um agrotóxico é avaliada em termos de meia vida, período que leva para 50% da substancia ser degradada, observou-se que o Tebutiuram e o Dicloreto de Paraquate apresentaram mais dias, relevante a lixiviação, e o Metribuzim e o Picloram, relevante ao escoamento, para a primeira e segunda safra, nesta ordem. Os agrotóxicos que possuem uma meia vida mais longa são mais persistentes e maior potencial de lixiviação/escoamento (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1993).

Os aspectos ambientais (solo e clima) também influenciam no potencial dos agrotóxicos. De acordo com as Tabelas 16 e 17, quanto a textura do solo, foi considerado um

solo franco. Franke et al. (2013) afirmam que a textura determina o movimento da água e conseqüentemente dos agrotóxicos dissolvidos, sendo que quanto mais próximo das características do solo arenoso menor é o escoamento e maior a lixiviação. Ainda segundo os mesmos autores, o teor de matéria orgânica influenciará na biodegradabilidade dos princípios ativos dos agrotóxicos. Na presente tese o conteúdo com 2,07dag/kg foi considerado um valor médio. Quanto ao clima, a intensidade de precipitação classificada como moderada, aponta para uma maior lixiviação dos poluentes e assim maior contaminação das águas subterrâneas, com aproximadamente 885mm de chuvas para as safras.

Por fim, as práticas culturais que são medidas para redução do risco de lixiviação/escoamento de agrotóxicos. De acordo com Franke et al. (2013) (Tabela 8) para países industrializados, deve-se classificar como ótima ou boa; em países emergentes, boa ou ruim; e em países em desenvolvimento, ruim ou péssima. No presente trabalho classificou-se como boa nas duas safras (Tabelas 16 e 17).

Em cada célula, das tabelas 16 e 17, têm-se os valores reais na parte superior e na parte de baixo são os valores do potencial de lixiviação/escoamento. Após a contagem dos valores e pesos dos fatores que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento dos agrotóxicos, pôde-se calcular a fração de lixiviação/escoamento. Portanto, exemplificando, o cálculo da fração (α) para o agrotóxico 2,4-D Amina, da primeira safra, tem-se (Equação 25):

$$\alpha = 0,0001 + \left(\frac{1*20+0*15+0*10+0,67*15+0,33*10+0,67*10+0,33*5+0,33*5+0,33*10}{20+15+10+15+10+10+5+5+10} \right) * (0,1 - 0,0001) \quad (25)$$

Os resultados da fração de lixiviação/escoamento (α), para todos os agrotóxicos utilizados na primeira e segunda safra, encontram-se no Apêndice C.

A partir dos valores da fração de lixiviação-escoamento (α), da taxa de aplicação da substância (TAQ), da carga de poluente (L) e da concentração máxima aceitável (C_{max}), determinou-se a pegada hídrica cinza (PHC) para cada agrotóxico e suas respectivas safras, tabelas 18 e 19.

Tabela 18: Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos usados no cultivo de cana-de-açúcar para a safra 2016/2017.

Agrotóxico	α	TAQ (t/ha)	L (t/ha)	C_{max} (t/m ³)	PHC (m ³ /ha)	PHC (m ³ /t)	PHC (m ³)
1	2	3	4=2*3	5	6=4/5	7=6/P	8= 6*18,42
2,4 D Amina	0,0467	0,00053	2,5E-05	4E-09	6211,08	63,51	114408,1
Ametrina	0,0484	0,00099	4,8E-05	6E-08	793,77	8,12	14621,3
Dicloreto de Paraquate	0,0467	0,00017	8,1E-06	4E-08	203,16	2,08	3742,2
Diurom 468	0,0434	0,00070	3E-05	2E-10	152182,02	1556,21	2803193,7
Diurom 500	0,0434	0,00090	3,9E-05	2E-10	195105,15	1995,14	3593836,9
Diurom 800	0,0434	0,00092	4E-05	2E-10	199440,82	2039,48	3673699,9
Etiprole	0,0517	0,00020	1E-05	1E-10	103496,60	1058,36	1906407,4
Glifosato	0,0317	0,00171	5,4E-05	6,5E-08	833,47	8,52	15352,6
Hexazinona	0,0601	0,00020	1,2E-05	6E-07	19,83	0,2	365,3
Isoxaflutol	0,0401	0,00010	3,9E-06	1E-10	39107,20	399,91	720354,6
Metribuzim 480	0,0517	0,00081	4,2E-05	1E-09	41729,83	426,73	768663,4
MSMA	0,0467	0,00117	5,5E-05	1E-08	5460,56	55,84	100583,4
Tebutirom	0,0601	0,00076	4,5E-05	1,6E-09	28354,95	289,96	522298,1

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 19: Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos usados no cultivo de cana-de-açúcar para a safra 2017/2018.

Agrotóxico	α	TAQ (t/ha)	L (t/ha)	C_{max} (t/m ³)	PHC (m ³ /ha)	PHC (m ³ /t)	PHC (m ³)
1	2	3	4=2*3	5	6=4/5	7=6/P	8=6*18,42
2,4 D Amina	0,0467	0,00064	3E-05	4E-09	7434,47	81,67	136942,9
Ametrina	0,0484	0,00101	4,9E-05	6E-08	813,92	8,94	14992,4
Dicloreto de Paraquate	0,0467	0,00019	9,1E-06	4E-08	226,51	2,49	4172,3
Glifosato	0,0317	0,00170	5,4E-05	6,5E-08	827,16	9,09	15236,3
Imazapique	0,0601	0,00012	7,2E-06	1E-10	71507,04	785,53	1317159,7
Isoxaflutol	0,0401	0,00010	3,9E-06	1E-10	39107,20	429,61	720354,6
Metribuzim 480	0,0517	0,00095	4,9E-05	1E-09	48933,19	537,55	901349,4
Metribuzim 700	0,0517	0,00105	5,4E-05	1E-09	54335,72	596,9	1000863,9
Picloram	0,0634	0,00014	9,1E-06	2,9E-08	314,03	3,45	5784,5

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a primeira safra, conforme a Tabela 18, o agrotóxico que obteve maior PHC foi o Diurom 800, portanto, considerando a produtividade média, para a área e a safra estudada, de 97,79 t/ha, a PHC da cana-de-açúcar foi 2039,48 m³/t. Enquanto para a segunda safra, conforme Tabela 19, o Imazapique apresentou maior PHC, considerando-se a produtividade de 91,03 t/ha, a PHC da safra correspondente, foi 785,53m³/t. Estes valores da pegada hídrica contemplaram os poluentes mais críticos de cada safra, os quais de acordo com Hoekstra et al.

(2011) são aqueles que geram maior volume de água poluída e que devem entrar na contabilização da PH cinza da cana-de-açúcar.

Observa-se que os agrotóxicos Diurom 800 e Imazapique, apesar de apresentarem os maiores resultados de PH cinza, não foram os que tiveram maiores taxas de aplicação. Isso ocorreu devido ao baixo valor da concentração máxima (C_{max}) permitida por lei, juntamente ao alto resultado de fração lixiviação/escoamento. O mesmo comportamento foi encontrado por Fagundes (2016), onde o Difenconazol, Metomil e Trifloxistrobina, tiveram a maior PH cinza para algodão, milho e soja, respectivamente, entretanto não foram responsáveis pela maiores taxas de aplicação.

A concentração máxima aceitável deve priorizar as legislações locais, uma vez que os valores podem diferir de lugar para lugar. Entretanto, nesta tese, os únicos agrotóxicos que, tinham suas concentrações máximas aceitáveis, na legislação brasileira, foram o 2,4D Amina e o Glifosato. Portanto, se faz necessário uma atualização das leis do Brasil, afim de indicar a concentração permitida dos princípios ativos encontrados nos agrotóxicos, de acordo com a realidade do país.

4.2 PH do processo de fabricação dos subprodutos etanol e açúcar

A PH azul para a fabricação do etanol correspondeu a divisão do volume da água pelo do etanol conforme resultados apresentado na Tabela 20:

Tabela 20: Pegada hídrica azul no processo de fabricação do etanol.

Safra	Rendimento do etanol por t de cana	Quantidade de cana esmagada por dia	Volume de etanol produzido por dia	Volume de água consumido por dia	PH azul no processo de fabricação do etanol
	(L/t)	(t)	(L)	(L)	(L de água/ L etanol)
I	86,82	10 mil	$868,2 \times 10^3$	$6,48 \times 10^6$	7,46
II	79,45	10 mil	$794,5 \times 10^3$	$6,48 \times 10^6$	8,16

Fonte: Elaboração própria (2019).

Todos os dados, da Tabela 20, exceto a PH azul, foram informados pela usina. O consumo diário de água de 6480 m^3 está descrito no item 3.4.3 que trata da metodologia da pegada hídrica no processo de fabricação do etanol e açúcar.

A PH da fabricação do etanol ainda pôde ser calculada em m^3/t . Considerando a densidade de $0,789 \text{ kg/L}$ e a produção de $868,2 \times 10^3 \text{ L/ dia}$, a massa do etanol foi 685 t .

Portanto, a PH para a fabricação do etanol, em m^3/t , foi o volume da água consumido pela massa do etanol, que correspondeu a 9,46 m^3/t , para primeira safra, e 10,34 m^3/t para a segunda safra.

A PH azul durante o processo de fabricação do açúcar correspondeu a divisão do volume da água pela massa do produto, conforme resultados apresentado na Tabela 21:

Tabela 21: Pegada hídrica azul no processo de fabricação do açúcar.

Safra	Rendimento do açúcar	Quantidade de cana esmagada	Massa de açúcar produzido por dia	Volume de água consumido por dia	PH azul no processo de fabricação do açúcar
	(kg/t)	(t)	(t)	(m^3)	(m^3 água/t açúcar)
I	141,53	10 mil	1415,3	6480	4,58
II	132,44	10 mil	1324,4	6480	4,89

Fonte: Elaboração própria (2019).

Constata-se, diante dos resultados da PH no processo da fabricação dos produtos derivados da cana-de-açúcar, que o etanol, com uma média de 9,9 m^3/t , obteve uma PH 47,5% maior quando comparada a PH da fabricação do açúcar com 4,7 m^3/t em média.

4.3 Pegada hídrica total dos produtos etanol e açúcar

A pegada hídrica do produto (p) corresponde ao somatório da PH do processo de fabricação do produto ($PH_{proc}[p]$) mais a PH do insumo ($PH_{prod}[i]$), que no caso é a cana-de-açúcar, dividida pela fp (fração de peso) e tudo multiplicado por fv (fração de valor). Na PH do etanol e do açúcar, têm-se o processos de cultivo de cana-de-açúcar e de fabricação do produto dentro da usina. Portanto o somatório destes dois processos, consiste na PH total para o etanol e açúcar (Tabela 22 e 23)

Tabela 22: Resultado da pegada hídrica para o produto etanol nas Safras I (2016/2017) e II (2017/2018).

Safra	fp	fv	PH processo (p)	PH prod (i)	PH prod (p)			
					(m ³ água/t etanol)			
	(t etanol / t cana)	adm	(m ³ água / t etanol)	(m ³ água / t cana)	Verde	Azul	Cinza	Total
I	0,07	0,89	9,46	2364,87	468,90	3676,62	25930,53	30076,05
II	0,06	0,89	10,34	1043,92	658,01	3183,98	11652,03	15494,02

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 23: Resultado da pegada hídrica para o produto açúcar nas Safras I (2016/2017) e II (2017/2018).

Saфра	fp	fv	PH	PH prod (i)	PH prod (p)			
			processo (p)		Verde	Azul	Cinza	Total
	(t açúcar / t cana)	adm	(m ³ água / t açúcar)	(m ³ água / t cana)		(m ³ água / t açúcar)		
I	0,14	0,87	4,58	2364,87	229,18	1796,87	12673,91	14699,96
II	0,13	0,87	4,89	1043,92	296,87	1436,61	5257,01	6990,49

Fonte: Elaboração própria (2019).

A PH verde, azul, cinza e total foram calculadas de formas diferentes, exemplificando, nessa respectiva ordem, para o produto etanol na primeira safra, tem-se:

$$PH(verde)_{prod\ etanol} = \left(0 + \frac{36,88}{0,07}\right) 0,89 \quad (26)$$

$$PH(azul)_{prod\ etanol} = \left(9,46 + \frac{288,51}{0,07}\right) 0,89 \quad (27)$$

$$PH(cinza)_{prod\ etanol} = \left(0 + \frac{2039,48}{0,07}\right) 0,89 \quad (28)$$

$$PH(total)_{prod\ etanol} = \left(9,46 + \frac{2364,87}{0,07}\right) 0,89 \quad (29)$$

Em termos de consumo de água total para a produção, observa-se que no geral o etanol tem maior PH que o açúcar, sendo as componentes cinza, azul e verde representadas pelo maior consumo ao menor consumo, nessa ordem. Entre as safras, a PH total foi inferior para a safra 2017/2018, reflexo da menor PH cinza. Os valores encontrados com mais de 30mil e 14mil m³ de água para produzir 1 tonelada de etanol e açúcar, respectivamente, representam um consumo elevado de água na agroindústria canavieira.

Para converter a PH do etanol em L de água/L de etanol, multiplicou-se a PH do etanol (m³/t = L água /kg etanol) pela sua densidade de 0,789kg etanol/ L de etanol. Com isso, os resultados de PH do etanol em L de água/ L de etanol (Tabela 24):

Tabela 24: PH do produto etanol em L de água por L de etanol.

Saфра	PH prod (p)			
	(L de água/ L de etanol)			
	Verde	Azul	Cinza	Total
I	369,96	2900,85	20459,19	23730,01
II	519,17	2512,16	9193,45	12224,78

Fonte: Elaboração própria (2019).

Os resultados da PH total dos produtos, etanol e açúcar, foram superiores aos apresentados por diferentes autores (Tabela 25), visto que, nenhuma pesquisa abordou na PH cinza os impactos dos agrotóxicos utilizados, apenas analisaram o efeito do nitrogênio, que subestima a PH total, por ser um poluente menos crítico.

Tabela 25: Pegada hídrica dos produtos Etanol e Açúcar para diferentes autores.

Autores	Localização	Etanol				Açúcar			
		L de água/ L etanol				m ³ de água/ t de açúcar			
		PH verde	PH azul	PH cinza	total	PH verde	PH azul	PH cinza	total
Gerbens-Leens e Hoekstra (2009)	media global				2855				
	media Brasil				2450				
Scholten (2009)	média global	1276	1416	164	2856	670	743	86	1499
	média Brasil	1344	1013,1	89,9	2447	706	532	47	1285
Mekonnen e Hoekstra (2011)	média global	1400	575	132	2107	1184	487	111	1782
Andrade jr et al (2012)	Piauí	1638	227	216	2081	1175	163	155	1493
Chico et al. (2015)	Alagoas	774	455		1229				
Santiago et al 2017	Alagoas	1154	63	785	2002				

Fonte: Elaboração própria (2019).

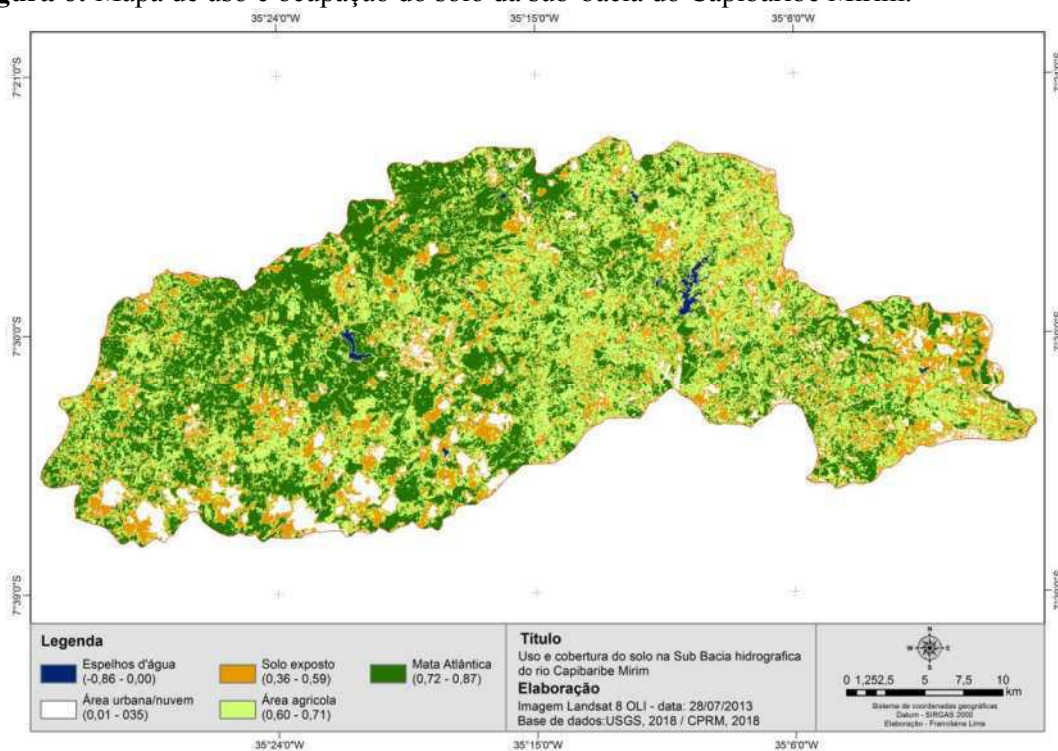
Para o produto etanol, ao comparar a soma da PH verde mais a azul, excluindo a componente cinza, observa-se que para este trabalho variou de 3031,16 a 3270,81 (L de água / L de etanol), enquanto para outros autores (Tabela 25) os resultados foram inferiores, entre 1217 a 2692 (L de água / L de etanol), exceto o primeiro autor que não apresentou suas componentes. Para o produto açúcar, tem-se a soma da PH verde e azul variando de 1733,48 a 2026,05 (m³ de água/t de açúcar), já para outros autores (Tabela 25) foi entre 1328 a 1671 (m³ de água/t de açúcar). Visto isto, o somatório da PH verde e azul para os produtos, foram ligeiramente superiores aos relatados por outros autores, como reação das características do local e das cultivares.

Scholten(2009), Andrade Jr. et al.(2012), afirmaram que não consideraram o volume de água consumido no processo de fabricação industrial, portanto subestimam a PH azul dos produtos.

4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo

O mapeamento do uso e ocupação do solo da sub-bacia do Rio Capibaribe Mirim, apresentou para os 961,29 km² da área: 5,04 km² ou 0,52% (espelho de água); 66,21 ou 6,89% (área urbana); 172,65 km² ou 17,96% (solo exposto); 396,78 km² ou 41,28% (área agrícola); 320,61 km² ou 33,35% (Mata Atlântica) (Figura 6).

Figura 6: Mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia do Capibaribe Mirim.



Fonte: Elaboração própria (2019).

O índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN), utilizado no presente mapa indica que valores abaixo de zero são espelhos de água e os índices mais elevados são para a Mata Atlântica. Observa-se que nesta sub-bacia prevalece a atividade agrícola e a presença da Mata Atlântica, sendo os espelhos de água a menor proporção.

Para a Mata Atlântica os valores de IVDN foram entre 0,72 a 0,87, indicando uma vegetação densa na área de estudo, uma vez que quanto mais próximo de 1 maior a cobertura vegetal (ROSENDO, 2005). Esses valores colaboram com resultados encontrados por autores, os quais caracterizaram o uso e ocupação do solo, para regiões de Mata Atlântica, com resultados entre 0,7 e 0,9. Montanher e Fragal (2013) identificaram para o mesmo bioma

valores até 0,9; Leite et al. (2017) encontraram IVDN variando de 0,45 a 0,89 para a Mata Atlântica, sendo a vegetação menos densa os resultados menores. Para solo exposto, Leite et al. (2017), acharam o IVDN com uma média de 0,34, observa-se que a média para solo exposto na presente tese foi 0,47, isso implica dizer que a tese obteve áreas mais conservadas.

Demarchi et al. (2011), em mapeamento de uso e ocupação do solo, identificaram nas regiões com atividade agrícola, como o cultivo de cana-de-açúcar, valores de IVDN entre 0,2 a 0,5, enquanto regiões de mata nativa entre 0,5 a 0,9. Agarez et al. (2001); Oliveira et al. (2013) evidenciam que resultados elevados de IVDN são encontrados em áreas com menor histórico de antropização, já os valores reduzidos são para regiões com intensa ação de desmatamento, como a expansão da cultura agrícola canavieira.

4.5 Sustentabilidade ambiental da pegada hídrica da agroindústria canavieira na sub-bacia

4.5.1 Sustentabilidade para os períodos seco e chuvoso

Os valores da sustentabilidade ambiental julgaram as vazões dos períodos seco e chuvoso, de acordo com as características pluviométricas da região, representando a estação seca de setembro a fevereiro, enquanto os meses chuvosos, de março a agosto. Em geral a escassez de água (EA) verde foi sustentável, para os meses secos e chuvosos nas duas safras; a EA_{azul} foi sustentável para na estação seca (na vazão máxima e média) e chuvosa, nas duas safras e série histórica; o NPA foi sustentável apenas no ponto chuvoso para vazão máxima, nas duas safras e série histórica (Tabela 26 e 27).

Tabela 26: Sustentabilidade ambiental durante o período seco.

PERÍODO SECO (SET, OUT, NOV, DEZ, JAN, FEV)				
Indicadores de Sustentabilidade	Média das vazões	Safra 2016/2017	Safra 2017/2018	Série histórica (2000-2017) utilizando a média da PH da duas safras
EA _{verde} (%)	-	6,22	12,80	-
EA _{azul} (%)	máximas	42,68	96,22	36,57
	mínimas	100,23	101,32	88,73
	médias	83,42	99,78	73,80
NPA cinza (%)	máximas	518,10	6730,23	319,65
	mínimas	54463,13	192773,04	3939,62
	médias	3288,84	21250,57	1511,58

Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 27: Sustentabilidade ambiental durante o período chuvoso.

Indicadores de Sustentabilidade	Média das vazões	PERÍODO CHUVOSO (MAR, ABR, MAIO, JUN, JULH, AGOS)		
		Safra 2016/2017	Safra 2017/2018	Série histórica (2000-2017) utilizando a média da PH da duas safras
EA _{verde} (%)	-	8,65	11,89	-
EA _{azul} (%)	máximas	11,49	13,74	11,04
	mínimas	96,95	96,58	76,41
	médias	48,94	53,13	39,48
NPA cinza (%)	máximas	91,18	57,98	69,25
	mínimas	15061,71	7255,31	1727,84
	médias	664,83	406,78	361,27

Fonte: Elaboração própria (2019).

De acordo com os valores apresentados nas tabelas 26 e 27, observa-se que no geral a sustentabilidade das componentes verde e azul, foram melhores, quando comparadas ao NPA, para as duas safras, uma vez que a PH cinza foi a responsável por mais de 70% de contribuição da PH na cana-de-açúcar (Gráfico 4).

Outro comportamento constatado foi em referência as safras, com o aumento dos valores dos indicadores de sustentabilidade da safra I para safra II, exceto o NPA no período chuvoso, que obteve uma redução. Isso aconteceu devido a disponibilidade de água verde, azul e cinza terem seus valores reduzidos da primeira para segunda safra (Tabela 28), conseqüentemente os resultados dos indicadores de sustentabilidade aumentaram. Porém o NPA, no período chuvoso, diminuiu em 36%, da primeira para segunda safra (vazões máximas), sendo o reflexo da PH cinza da cana-de-açúcar que foi reduzida em 61% da primeira para segunda safra (Gráfico 3).

Tabela 28: Disponibilidade de água verde e azul e escoamento real da bacia.

Safras	Períodos	Disponibilidade de água (m ³)		
		DA verde	DA azul	Q real
Safra (2016/2017)	PS	882.838.539,5	1.011.030.409	586.096.560
	PC	634.656.963,4	3.755.365.849	3.330.432.000
Safra (2017/2018)	PS	557.271.075,6	359.763.579,3	18.766.800
	PC	599.850.896,6	2.519.443.179	2.178.446.400
Série histórica	PS	-	1.069.397.308	684.215.228,4
	PC	-	3.543.667.781	3.158.485.701

DA verde = disponibilidade de água verde (m³); DA azul = disponibilidade de água azul(m³); Qreal = escoamento real da bacia (m³) para cálculo de NPA; PS = período seco; PC = período chuvoso.

Fonte: Elaboração própria (2019).

Em relação a série histórica, foi mais sustentável do que as safras. Observa-se uma redução na EA_{azul} e NPA na série histórica, quando comparada aos resultados das safras

(Tabelas 26 e 27). Os dados de disponibilidade colabora para essa constatação, uma vez que a DA azul e o escoamento real, da série, foram superiores em referência as safras (Tabela 28).

Quando comparado os períodos, observa-se que o chuvoso (Tabela 27) apresentou resultado de sustentabilidade mais favorável quanto ao seco (Tabela 26), exceto a EA_{verde} na primeira safra, que aumentou seu valor para a estação chuvosa, porém permaneceu sustentável. Isso ocorreu devido a redução da DA verde na primeira safra, onde o período seco teve uma disponibilidade maior de água, com mais de 880 milhões de m^3 de água, quando comparado ao chuvoso com menos de 635 milhões de m^3 (Tabela 28).

Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), em análise de sustentabilidade da PH na bacia hidrográfica do rio Segura, Espanha, onde se tem uma precipitação anual média de 400mm, identificaram também pontos de insustentabilidade. A EA_{verde} variou nas zonas selecionadas da bacia de 0,68 a 0,99, ou seja, já próximo da insustentabilidade. Já a EA_{azul} foi de 0 (meses de inverno) a 20 (meses de seca), enquanto para o ano completo foi 1,30, portanto um planejamento hídrico sem sustentabilidade. Para o NPA variou de 0,07 a 6,27 da nascente a foz, sendo mais insustentável ao se aproximar da foz. Nota-se que a determinação de períodos e os locais selecionados na bacia são fundamentais para uma melhor caracterização da gestão do recurso hídrico.

Leal et al. (2018), em estudo na bacia do rio Itapemirim, Espírito Santo, identificaram também a sustentabilidade da bacia, considerando os vários tipos de uso da água, na agricultura por exemplo, tem-se o cultivo de cana-de-açúcar. No caso citado, apenas a PH verde foi insustentável, e principalmente nos meses secos.

Liu et al.(2012); Hoekstra et al. (2012) e Miguel et al. (2015) estudaram a sustentabilidade de bacias onde a maior contribuição foi o cultivo de cana-de-açúcar. Os resultados do NPA para Liu et al.(2012) foram: 3,79; 2,51 e 0,06, para as bacias do rio Ganges, Indus e Nilo. Já a EA_{azul} , para os mesmos rios, na mesma ordem, de acordo com Hoekstra et al. (2012), foi 2,41; 2,71 e 0,85. Observa-se que tanto o NPA e a EA_{azul} foram insustentáveis em algumas bacias que possuíam atividade canavieira, como também demonstrado na pesquisa de Miguel et al. (2015),

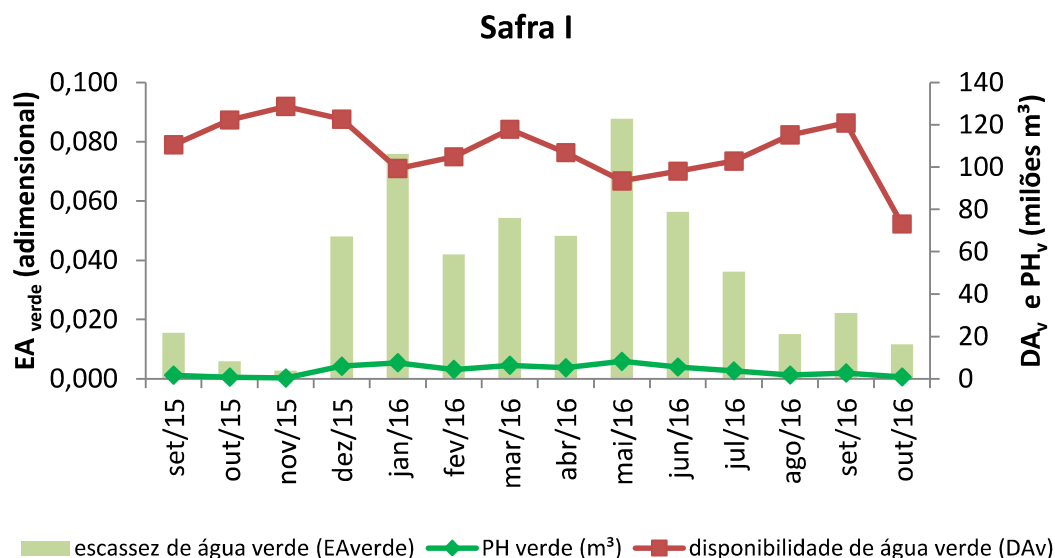
Vale ressaltar que em todos os casos citados acima, Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), Leal et al. (2018), Liu et al.(2012), Hoekstra et al. (2012) e Miguel et al. (2015), avaliaram a sustentabilidade das bacias, algumas com cultivo de cana-de-açúcar, considerando apenas o uso de fertilizantes nitrogenados para o NPA, os quais são poluentes menos críticos, e mesmo assim apresentaram-se insustentáveis. Nenhum estudo analisou a

sustentabilidade da componente cinza em relação ao uso de agrotóxicos, como na presente tese. Com isso, infere-se que essa pesquisa foi pioneira na análise da sustentabilidade da PH cinza ao considerar os efeitos dos agrotóxicos.

4.5.2 Sustentabilidade para o período mensal

A sustentabilidade ambiental da componente verde foi determinada pela escassez de água verde (EA_{verde}), analisada mês a mês e considerando a vazão média mensal. Para a primeira safra a EA_{verde} foi de 0,3% (novembro/15) a 8% (maio/16), enquanto a segunda safra foi de 0,06% (outubro/16) a 20,27 % (julho/17). Portanto a EA_{verde} foi sustentável para todos os meses, ou seja a água verde disponível não foi totalmente consumida (Gráfico 6 e 7).

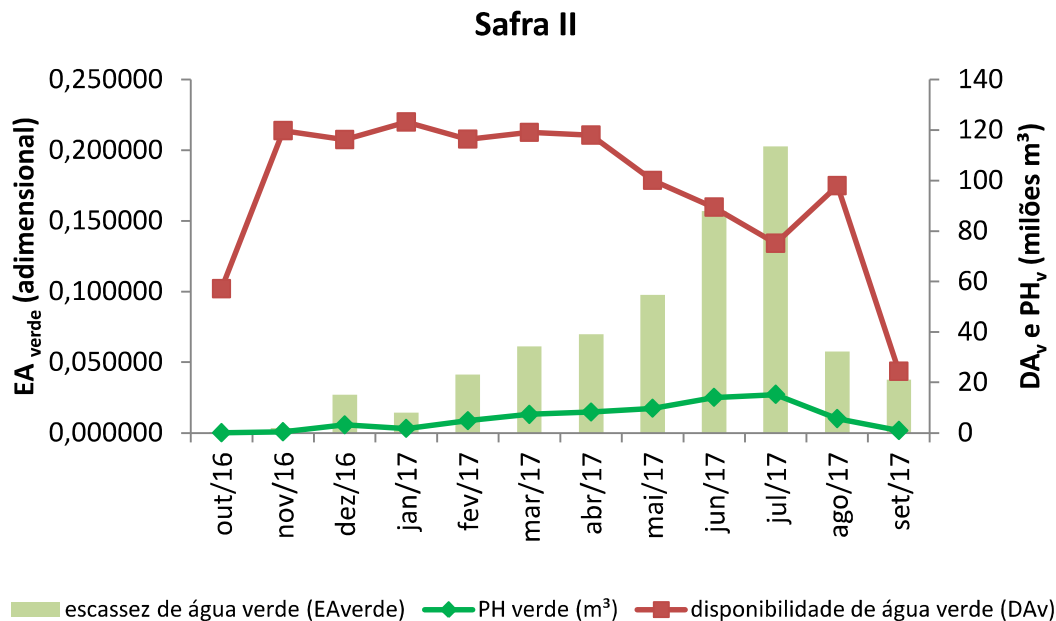
Gráfico 6: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica verde da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra I (2016/2017) de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Na disponibilidade de água verde para safra 2016/2017, o mês de novembro/15 obteve o maior volume com 128.674.463,3 m^3 e outubro/16 o menor volume com 73111667,8 m^3 . Já a PHv, teve o comportamento semelhante a EA_{verde} , sendo o mês novembro/15 com 365412,8 m^3 e maio/16 com 8208224,3 m^3 , com menor e maior valor respectivamente.

Gráfico 7: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica verde da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra II (2017/2018) de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração própria (2019).

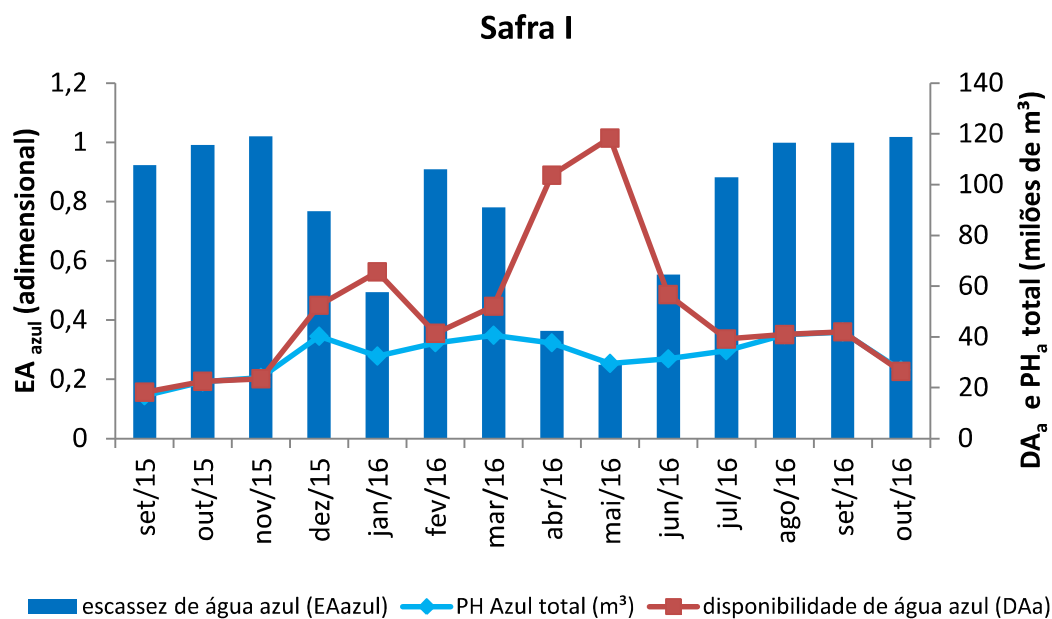
A disponibilidade de água verde para safra 2017/2018, obteve o maior e o menor volume, respectivamente, para o mês de janeiro/17 ($123.138.218,3\text{m}^3$) e setembro/17 ($24.364.577,1\text{m}^3$). Já a PHv, no mês de outubro/16 com $35326,6\text{ m}^3$ e julho/17 com $15233549,1\text{ m}^3$, com menor e maior nessa ordem.

A avaliação da sustentabilidade da componente azul realizada pela escassez de água azul (EA_{azul}) mensalmente, apresenta resultados mais detalhados, sendo possível determinar a dinâmica da água azul utilizada na agroindústria canavieira dentro da sub-bacia. A EA_{azul} considera a razão entre as somas das pegadas hídricas e a disponibilidade de água azul. Sabe-se que a PH azul total da atividade canavieira corresponde ao somatório das pegadas dos processos envolvidos, ou seja, a PH azul do cultivo da cana-de-açúcar mais a PH azul para a fabricação dos subprodutos açúcar e etanol. Quanto a disponibilidade de água, considerou a vazão média mensal.

De acordo com o Gráfico 8, o mês de novembro/15 e outubro/16, a PH azul total foi superior a disponibilidade de água azul, tornando insustentável a PH azul e violando a demanda de vazão ambiental. Isso ocorreu devido ao escoamento real ser zero para os dois meses (Apêndice A). Nesses dois meses, na devida ordem, tem-se a EA_{azul} de 102% e

101,8%. Nos meses de abril a junho observa-se um nível de EA_{azul} menor, portanto, um cenário mais sustentável, justamente pela maior disponibilidade de água azul.

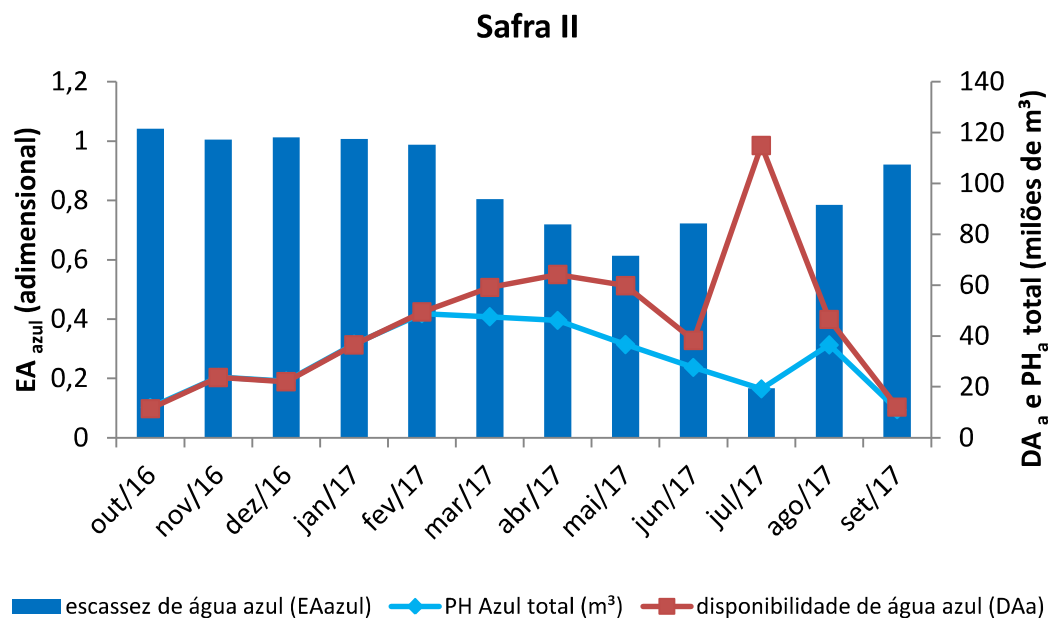
Gráfico 8: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica azul da agroindústria canavieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra I (2016/2017) de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Durante a segunda safra, os meses de outubro/16 até janeiro/17, houve o consumo total da água azul disponível, atingindo níveis de EA_{azul} de 104%; 100,5; 101,2 e 100%, respectivamente. Nos meses de abril a julho, o nível EA_{azul} foi mais sustentável, sendo o mês de julho a maior vazão da safra, com 37,12m³/s (Apêndice A), contribuindo para a disponibilidade de água disponível (Gráfico 9).

Gráfico 9: Sustentabilidade mensal da pegada hídrica azul da agroindústria canieira na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim para a safra II (2017/2018) de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaboração própria (2019).

A sustentabilidade ambiental da componente cinza (NPA) não foi possível calcular mês a mês, uma vez que não se tem a precisão da PH cinza aplicada mensalmente

4.5.3 Sustentabilidade para o período de safra completa

O indicador de escassez de água verde (EA_{verde}) foi utilizado para a análise da sustentabilidade ambiental verde, para o período de safra completa, empregando nos cálculos a PH verde do cultivo de cana-de-açúcar (Gráfico 3) multiplicada pela sua produção, em relação a disponibilidade de água verde (com a evapotranspiração acumulada para toda a safra). Os dados apresentaram, para o ciclo total da safra, uma EA_{verde} de 3,62 e 6,16%, para primeira e segunda safra, na ordem, portanto sustentáveis.

Para a componente azul, a EA_{azul} foi 64% e 69,3%, para a primeira safra e segunda safra respectivamente, logo a atividade canieira foi sustentável ao considerar a pegada hídrica azul do período completo das safras.

Para a sustentabilidade ambiental, no período completo da safra, da componente cinza, tem-se um NPA de 29,17% e 17,71%. Considerando, para esses valores, a vazão máxima

diária que ocorreu durante toda a safra. No caso para primeira e segunda safra o dia que apresentou a maior vazão foi durante o mês de abril (291,74 m³/s) e o mês de julho (254,04m³/s), respectivamente, conforme Apêndice A. Portanto, nessa configuração o NPA foi sustentável

Usando-se a média das vazões médias, tem-se o NPA igual a 1221,93% e 798,28%, primeira e segunda safra respectivamente. Portanto, para a safra completa, a componente cinza foi insustentável, ao considerar a vazão média, violando os padrões da água em seu estado natural.

Quando se compara o NPA dos períodos seco e chuvoso, com toda a safra, há uma semelhança. Observe-se que apenas no período chuvoso (Tabela 27), durante a média das vazões máximas, obtém-se a sustentabilidade do NPA.

De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2015), o NPA em algumas bacias que estudaram também foram insustentáveis, principalmente pela carga de poluente. Eles apresentam que para a Bacia Yangtze o NPA foi 2 ou 200%, mesmo sendo o terceiro maior rio do mundo, a capacidade de assimilação de resíduos do rio foi superutilizada. Para o Brasil, a bacia hidrográfica Amazônica e Paraná tiveram índices de NPA excelentes, com 0,9 e 30% respectivamente, entretanto, os autores consideraram apenas a poluição por nitrogênio, desconsiderando os agrotóxicos utilizados nos cultivos.

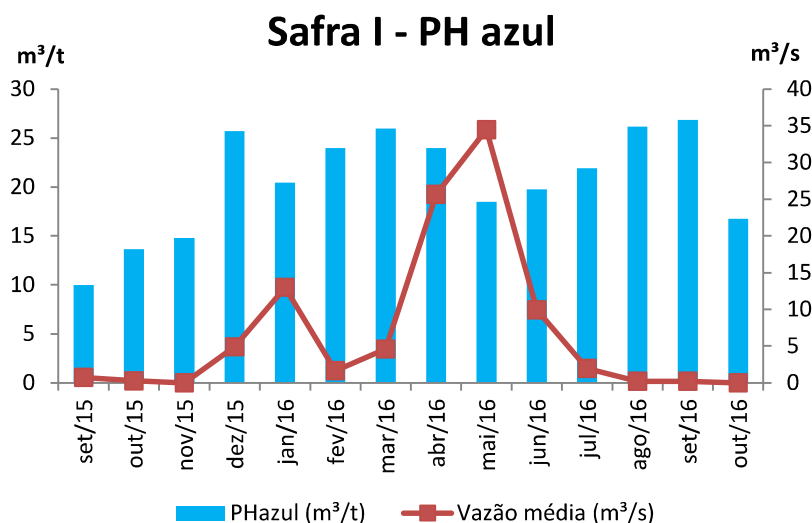
4.6 Formulação de respostas para redução da pegada hídrica

De acordo com os dados apresentados de sustentabilidade, tem-se alto potencial para a redução da PH principalmente no período seco (setembro a fevereiro) e outro destaque é para a PH cinza. O baixo potencial de redução, igual a zero, foi para a PH verde, a qual foi sustentável para todos os casos analisados, portanto não realizou possíveis propostas para reduzi-la.

A PH azul, na maioria das vezes, exibiu-se sustentável, exceto para o período seco, o qual foi ligeiramente insustentável para as duas safras, menos a série histórica. Como visto anteriormente, as vazões influenciaram diretamente na EA_{azul} , ao analisarmos mês a mês as safras. Quanto a PH não interferiu tão expressivamente para a EA_{azul} , como a vazão. Os gráficos 10 e 11 apontam que os meses críticos da 1ª safra: novembro/15 e outubro/16, e 2ª safra: outubro/16 a janeiro/17, não apresentaram os maiores valores de PH. Portanto, reduzir a

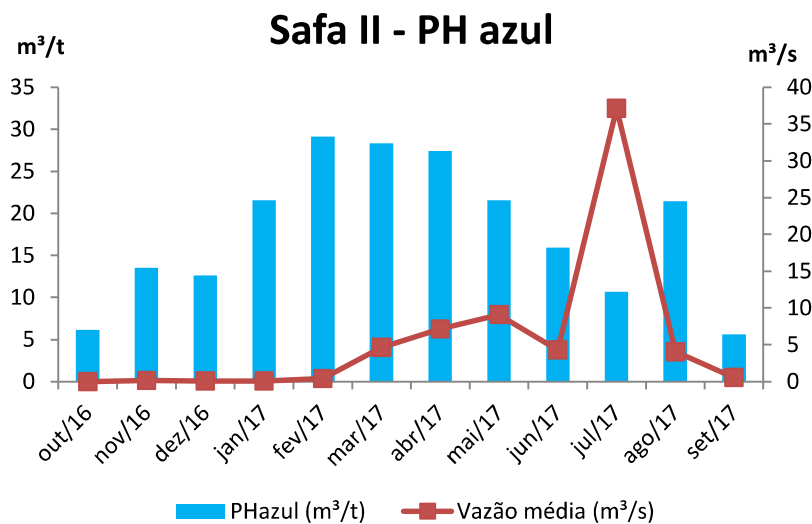
demanda de água não é uma opção, sendo a essência para alcançar a sustentabilidade EA_{azul} , nesse estudo, é o aumento da disponibilidade de água azul.

Gráfico 10: PH azul e vazão média mensal para a safra I (2016/2017), na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Gráfico 11: PH azul e vazão média mensal para a safra II (2017/2018), na sub-bacia do rio Capibaribe Mirim.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Possíveis metas que poderiam ser adotadas, como proposto por Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), seriam a transferência de água de outras bacias, reuso de água e/ou água dessalinizada. Para o presente estudo, é tecnicamente inviável a dessalinização uma vez que não há planta de dessalinização na região. A transferência de água de outras bacias podem gerar conflitos socioeconômicos, portanto a melhor alternativa seria o reuso de água para aumentar a disponibilidade hídrica.

Na usina estudada a técnica do reuso da água já é utilizada, entretanto, esse recurso poderá ser otimizado com a reorganização do cronograma de irrigação, ou seja, a água de reuso ser armazenada para utiliza-la apenas nos meses com menor disponibilidade hídrica.

Quanto ao nível de poluição de água, pela PH cinza, como demonstrado nas Tabelas 26 e 27, foi insustentável na maioria das situações expostas, exceto para a vazão máxima no período chuvoso. Observa-se que a sustentabilidade foi maior para a série histórica, seguida da segunda safra e por fim a primeira, isso no período chuvoso para as vazões máximas; durante a vazão média, apesar de insustentável, também apresentou essa sequência de comportamento.

Como se pode notar no Apêndice A, a média da vazão média da série histórica foi 11,72 m³/s, contra 5,64 e 6,96m³/s da segunda e primeira safra respectivamente. Portanto, a maior sustentabilidade da série se deu pela vazão ser superior e também pelo fato da PH cinza ter sido a média das safras. Para a primeira e segunda safra não houve tanta diferença na média da vazão, porém o NPA foi inferior para safra 2017/2018. De acordo com o Gráfico 3, a PH cinza da 1^o safra foi 2039,48 e a 2^o 785,33m³/t, ou seja, reduziu mais da metade do valor. Sendo assim, o grande influenciador na sustentabilidade da componente cinza foi a própria PH cinza.

Para mitigar a PH cinza, deve-se principalmente analisar os efeitos dos agrotóxicos utilizados, para ter como resposta os que seriam sustentáveis ou não. Na primeira safra o uso do Diurom 800 ultrapassou os 3 milhões de m³ de água necessário para diluí-lo enquanto o Imazapique ficou próximo de 1 milhão de m³. Logo, recomenda-se substituir os agrotóxicos por outros de menores PH. Essa proposta também foi identificada em trabalhos como Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016) e Matos et al. (2017).

4.7 Análise dos poluentes

A PH será influenciada e alterada através da seleção dos agrotóxicos a serem utilizados, como também pela legislação de qualidade da água para a região. Por essa razão a PH deve englobar o contexto sociopolítico, econômico e ambiental (Martins 2014). Alguns questionamentos são fundamentais para a compreensão dos resultados, como: Quais as atividades econômicas que estão inseridas na bacia hidrográfica, fazendo o uso do recurso hídrico? Qual a localização da área de estudo, para determinar as leis que regem o local? E por fim, quais as características edafoclimáticas da região, para a realização dos cálculos?

Para a análise da PH cinza é imprescindível conhecer estes questionamentos levantados. Nesse presente estudo, destaca-se o cultivo de cana-de-açúcar, sendo regido pela legislação de Pernambuco em uma região conhecida como Zona da Mata, a qual caracteriza-se pela presença de Mata Atlântica. A vista disto, a utilização de agrotóxicos nessa atividade canavieira inexoravelmente alterará a qualidade ambiental do recurso hídrico, de modo que é primordial a análise destes.

Na usina Olho D'Água os agrotóxicos utilizados para as safras de 2016/2017 e 2017/2018 estão na Tabela 13. Como visto, alguns apresentam, quanto a sua toxicidade, desde de extremamente tóxico (I) a pouco tóxico (IV), em uma escala que vai de I a IV. Quanto a periculosidade ambiental, em uma escala de classe I (altamente perigoso) a classe IV (pouco perigoso), o presente estudo obteve agrotóxicos da escala I até III. Quanto a lixiviação desses produtos será influenciada por suas propriedades químicas específicas e por fatores ambientais, como solo e clima da região (FRANKE et al., 2013).

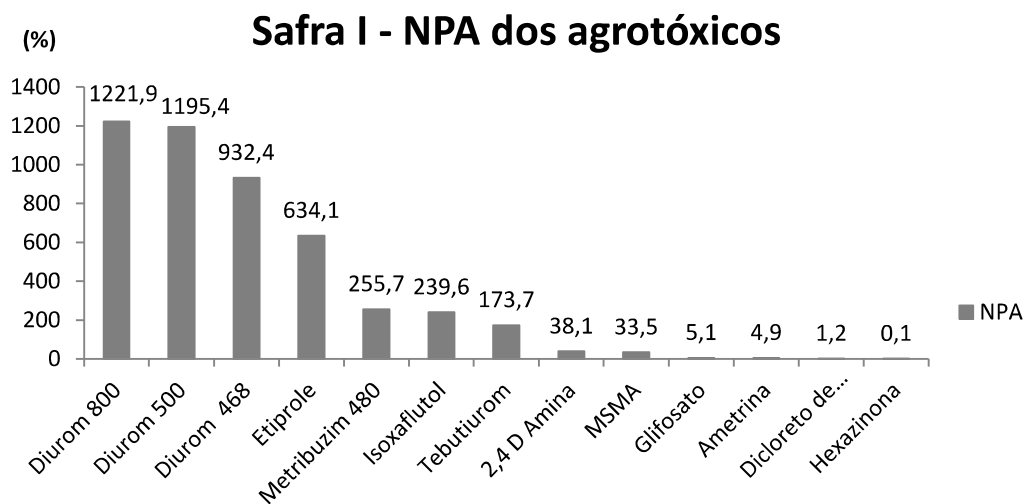
As propriedades químicas que interferem no potencial de lixiviação e escoamento são: Coeficiente de Partição de Carbono Orgânico em água (Koc) - é a tendência que o carbono orgânico de um composto tem para ser adsorvido pelo solo; e a persistência de lixiviação e escoamento, calculado para um tempo de meia vida, ou seja, ou tempo que leva para 50% da substância química seja degradada. Quanto aos fatores ambientais, destacam-se: a textura do solo que quanto mais argiloso maior o escoamento superficial e menor a lixiviação; o teor de matéria orgânica que influenciará na biodegradabilidade das substâncias químicas dos agrotóxicos; a precipitação e sua intensidade que quanto mais elevados os valores maior o potencial de lixiviação (FRANKE et al., 2013).

Diante do exposto, pode-se inferir que, para o agrotóxico que obteve a maior PH cinza, para a primeira safra, o Diurom 800 apresentou uma persistência de lixiviação alto e de

escoamento muito baixo. Para a segunda safra, o Imazapique, observa-se uma persistência de lixiviação muito alto e de escoamento próximo ao alto. Logo o Imazapique terá uma facilidade de contaminação das águas, por lixiviação e escoamento, maior que o Diurom 800.

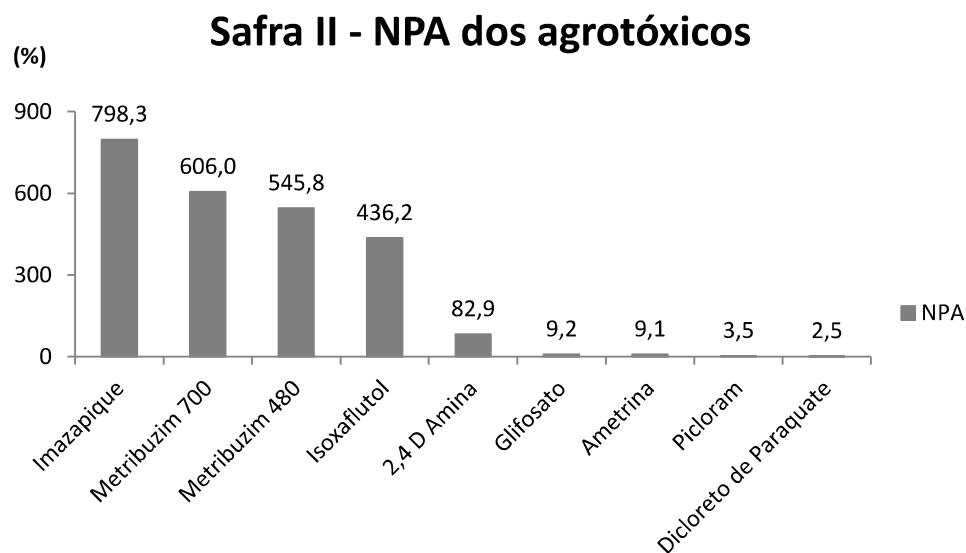
Apesar do Diurom 800 e Imazapique alcançarem as maiores PHs cinza nas safras, os mesmos não obtiveram as maiores taxas de aplicação. De acordo com as Tabelas 14 e 15, constata-se que o Glifosato e o Isoxaflutol apresentaram, respectivamente, a maior e menor taxa de aplicação para as duas safras. Esses dois últimos agrotóxicos, utilizados em ambas safras, foram, na mesma ordem, sustentável e insustentável (Gráfico 12 e 13), considerando a vazão média para toda a safra. Essa situação ocorreu devido ao Glifosato, mesmo com a maior taxa de aplicação, ter a maior concentração máxima permitida pela resolução CONAMA n° 357. Já o Isoxaflutol, mesmo com a menor taxa de aplicação, sua concentração máxima, está entre os agrotóxicos, que tem o menor valor (Tabela 18 e 19). Enquanto o Diurom 800 e o Imazapique, além de terem altas taxas de aplicação, suas concentrações máximas permitidas são baixas, elevando assim a PH cinza destes.

Gráfico 12: NPA dos agrotóxicos utilizados na primeira safra (2016/2017).



Fonte: Elaboração própria (2019).

Gráfico 13: NPA dos agrotóxicos utilizados na segunda safra (2017/2018).



Fonte: Elaboração própria (2019).

Os Gráficos 12 e 13 exibem o comportamento do NPA para os agrotóxicos utilizados nas safras. Nota-se que o Metribuzim 480 e o Isoxaflutol, presentes nas duas safras, foram insustentáveis, enquanto, o 2,4D Amina, Ametrina, Dicloreto de Paraquate e Glifosato foram sustentáveis. Observa-se que esses últimos agrotóxicos, tanto os sustentáveis como os insustentáveis, aumentaram o NPA da primeira para a segunda safra, devido ao aumento da taxa de aplicação de cada um (Tabela 15 e 16).

Entre os poluentes considerados sustentáveis, aplicados nas duas safras, o 2,4D Amina, Dicloreto de Paraquate e o Picloram, são considerados produtos extremamente tóxicos a saúde humana, e entre estes, o 2,4D Amina é um agrotóxico classificado como altamente perigoso ao meio ambiente (Tabela 13). Portanto, o 2,4D Amina, mesmo sendo sustentável, oferta mais riscos ao homem e meio ambiente. Os demais agrotóxicos sustentáveis, das duas safras, que não foram citados, apresentam-se como altamente a medianamente tóxicos, e quanto a periculosidade de muito perigoso a perigoso.

Entre os poluentes insustentáveis, o considerado pouco tóxico ao ser humano foi o Diurom 468 e o extremamente tóxicos foi o Isoxaflutol. Ainda na linha dos insustentáveis, a maioria apresentou-se como muito perigoso ao meio ambiente, apenas o Tebutirom e Imazapique foram apenas perigos a natureza. Observa-se que apesar de serem insustentáveis, nenhum deles classificou-se como altamente perigoso ao meio ambiente, como ocorreu nos

agrotóxicos sustentáveis. Outro ponto analisado foi que entre os insustentáveis, apenas um agrotóxico foi extremamente tóxico, já entre os sustentáveis foram três.

O nível de poluição das águas (NPA) não leva em consideração essa classificação de periculosidade ambiental e toxicidade. Apesar de alguns agrotóxicos, quanto ao seu NPA, apresentarem-se como sustentáveis foram os que obtiveram as piores classificações de toxicidade e periculosidade. Isso demonstra a necessidade de incluir na avaliação dos poluentes todas essas classificações.

O conhecimento do comportamento do NPA dos agrotóxicos utilizados é essencial para reduzir a PH cinza, pois permite realizar escolhas de substâncias que irão poluir menos os recursos hídricos, necessitando de uma menor quantidade de volume de água para diluí-los, e conseqüentemente sem riscos aos demais usuários. Somado, a colaboração na redução da PH cinza, a análise dos poluentes, permite caracteriza-los mais detalhadamente quanto ao risco para o homem e meio ambiente, podendo ser um indicador diferenciado na seleção dos agrotóxicos a serem empregados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a utilização da pegada hídrica (PH) como um indicador de sustentabilidade ambiental na agroindústria canavieira e na contribuição da gestão de recursos hídricos da sub-bacia do Rio Capibaribe Mirim onde a atividade de cultivo de cana-de-açúcar é intensa. A contabilização da PH considerou as componentes azul, verde e cinza para a cana-de-açúcar e azul para o processo de fabricação de etanol e açúcar, tomando como referência as safras de 2016/2017 e 2017/2018. Quanto a sustentabilidade ambiental, avaliou-se os períodos seco, chuvoso, mensal e safra completa, correspondentes às safras de 2016/2017, 2017/2018 e série histórica de 2000 a 2017.

Os resultados da PH da cana-de-açúcar indicaram que a componente que contribuiu menos para o valor total foi a verde, com no máximo 4%, enquanto a cinza foi a que mais influenciou, com mais de 75% na PH total do cultivo. Os agrotóxicos utilizados que mais colaboraram para essa resposta da PH cinza foram o Diurom 800 e Imazapique, com 2039,48 e 785,53 m³/t, na primeira e segunda safra.

No processo de fabricação, o valor da PH apresentou baixa contribuição para a PH total da atividade agroindustrial, sendo constituído apenas pela água azul, uma vez que não há consumo de água verde dentro da indústria, e a água cinza é reutilizada na fertirrigação. Para a PH dos subprodutos etanol e açúcar, somou-se os processos de cultivo de cana-de-açúcar e de fabricação, resultando em valores máximos de 23730,01 L de água/ L de etanol e 14699,96 m³ de água/ t de açúcar.

O mapeamento do uso e ocupação do solo foi realizado através da aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) e apresentou para a sub-bacia do Rio Capibaribe Mirim a predominância de atividade agrícola, com mais de 40% da área total, seguida de Mata Atlântica, solo exposto, área urbana e por fim espelho de água.

Quanto aos valores de sustentabilidade ambiental da PH, avaliaram-se os indicadores de escassez de água (EA) verde e azul e o nível de poluição da água (NPA). A componente verde apresentou-se sustentável para todos os períodos estudados, com no máximo 6% de EA_{verde}, para safra completa. Na PH azul houve insustentabilidade no período seco e mensal nas duas safras, sendo o valor máximo da EA_{azul} para safra completa igual a 69%. Quanto a PH cinza foi insustentável na maior parte dos casos, exceto para o período chuvoso, quando considerado a média das vazões máximas, para as duas safras e série histórica. O NPA mínimo, correspondente a safra completa, foi de 798%.

Algumas propostas para reduzir os níveis de insustentabilidade da agroindústria canavieira foram relatados para colaborar com a gestão do recursos hídrico na bacia do rio Capibaribe Mirim. Dentre elas, destaca-se a EA_{azul}, que pode ser melhorada através do aumento da disponibilidade hídrica, ou seja, armazenando a água de reuso para ser utilizada apenas nos meses mais secos. Quanto ao NPA, pode-se diminuir seu valor com a substituição de agrotóxicos mais sustentáveis.

Na análise de poluentes, os agrotóxicos Diurom 800 e Imazapique, apesar destes apresentarem os maiores NPA, não foram os que tiveram maiores taxas de aplicação. O Glifosato foi o agrotóxico com maior taxa de aplicação nas duas safras, porém como sua concentração máxima permitida, pela Resolução CONAMA nº357/2005, é mais elevada que as outras substâncias citadas, configura-se a ele um nível de sustentabilidade. Observou-se também que, apesar de alguns agrotóxicos apresentarem-se como sustentáveis, quanto ao seu NPA, eles obtiveram as piores classificações de toxicidade ao ser humano e de periculosidade ambiental, ao comparar com os poluentes insustentáveis. Portanto, é necessário, além do NPA, a inclusão dessas classificações na avaliação mais detalhada dos agrotóxicos.

A análise da sustentabilidade ambiental da agroindústria canavieira, utilizando-se a pegada hídrica como indicador, permitiu ter o conhecimento do apoderamento do recursos hídrico, por essa atividade, dentro da sub-bacia Capibaribe Mirim. Foi possível auxiliar na gestão da água na região através de indicação de propostas para tornar a atividade sustentável. Conclui-se também que este estudo é pioneiro na contabilização da PH cinza, considerando os efeitos dos agrotóxicos, nos produtos etanol e açúcar, e na avaliação da sustentabilidade ambiental, através do nível de poluição da água, de cada agrotóxico utilizado no cultivo de cana-de-açúcar. Essa foi a primeira análise da sustentabilidade da pegada hídrica dentro da sub-bacia Capibaribe Mirim, portanto, é necessário realizar outros estudos da PH, das demais atividades inseridas nesta região que se utilizam deste recurso hídrico, para então avaliar a sustentabilidade de toda a sub-bacia.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ACAYABA, R. D. A. **Ocorrência de agrotóxicos usados na cana-de-açúcar em corpos d'água do Estado de São Paulo**. 2017. 84f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2017.

AGAREZ, F. V.; VICENS, R. S.; CRUZ, C. M.; NOGUEIRA, C. R.; GARAY, I. Utilização de índice de vegetação na classificação integrada de fragmentos florestais em Mata Atlântica de Tabuleiros Costeiros no município de Sooretama, ES. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais ...** Foz do Iguaçu: 2001. p.1499-1507.

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO E TECNOLOGIA (AGEITEC). **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar**. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html > Acesso em 10 de Outubro de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura de Recursos Hídricos no Brasil: informe 2015**. Brasília, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **2º Seminário mercado de agrotóxico e regulação**, 2012. Brasília: Anvisa. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/resultado-de-busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=2665456&_101_type=content&_101_groupId=219201&_101_urlTitle=seminario-volta-a-discutir-mercado-de-agrotoxicos-em-2012&inheritRedirect=true. Acesso em 12 setembro de 2018.

AGROFIT (sistema de agrotóxicos fitossanitários). **Registro agrotóxico**. Disponível em: < <http://indicadores.agricultura.gov.br/agrofit/index.htm> > Acesso em 10 outubro de 2018.

ÁGUA BRASIL. **Pegada Hídrica das Bacias hidrográficas**. 2014. Disponível em:< <http://www.bb.com.br/docs/pub/siteEsp/uds/dwn/pegadahidrica.pdf> > Acesso em 05 set. de 2016.

ALLAN, J. A. Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. **Groundwater**, v. 36, n. 4, p. 545-546, 1998.

ALLAN, J. A. Water stress and global mitigation: water food and trade. **Aridlands newsletter**. 1999. Disponível em: < <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln45/allan.html> >. Acesso em 05 Outubro de 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO, 1998 (Irrigation and Drainage, paper 56).

ANDRADE, M. C. de. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Revista estudos avançados**, v.15, n. 43, 2001.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; AGUIAR NETTO, A. O.; BRAGA, D. L.; SILVA, M. E.; NOLETO, D.H. Agricultural water footprint of ethanol and sugar from sugar cane under fertigation production system. In: International Conference of Agricultural Engineering, 2012 Spain. **Poster...**Spain, 2012. Available at:<
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65606/1/Agricultural7390001.pdf> >
 Accessed on: 3 june. 2018.

Agência Pernambucana de água e climas - APAC. **Boletim Pluviométrico Diário de 27/07/2013**. Disponível em : <
http://www.apac.pe.gov.br/arquivos_portal/boletinspluviometricos/Boletim%20Pluviometrico%2027.07.pdf > Acesso Dezembro de 2018.

Agência Pernambucana de água e climas - APAC. **Acumulado Mensal de Precipitação, Julho 2013**. Disponível em: <
http://www.apac.pe.gov.br/arquivos_portal/boletinsacummensalprec/ACUMULADO_MENSAL_JULHO_2013.pdf > Acesso Dezembro de 2018.

Agência Pernambucana de água e climas - APAC. **Boletim de informações climáticas do mês de dezembro de 2013**. Ano III, n.12,2014. Disponível em: <
http://www.apac.pe.gov.br/arquivos_portal/boletins/BOLETIM_DO_CLIMA_Dezembro_2013.pdf > Acesso Dezembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estruturas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSUNÇÃO, H. F. de. Hidrologia básica e aplicação. 1. ed. In: Gomes Filho, R. R. (Org.). **Gestão de Recursos Hídricos**. Goiânia: Gráfica e Editora América e co-edição com a Editora da UEG, 2013. 312p

BABEL, M. S.; SHRESTHA, B.; PERRET, S. R. Hydrological impact of biofuel production: a case study of the Khlong Phlo Watershed in Thailand. **Agricultural Water Management**, v. 101, p. 8 -26, 2011.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídricos em cana-de-açúcar (Saccharum spp)**. 1981. 82f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

BARSANO, P. R.; BARBOSA, R. P. **Meio Ambiente guia prático e didático**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013. 256p. ISBN: 978-85-365-0396-7.

BENETTI, A.D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. Metodologia para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.2, p.149-160, 2003.

BLENINGER, T.; KOTSUKA, L. K. Conceitos de água virtual e pegada hídrica: estudo de caso da soja e óleo de soja no Brasil. **Revista de Recursos Hídricos**, v.36, n.1,p.15-24, 2015.

BOFF, R. F. **Grey Water Footprint (GWF) by agrochemicals**: a case study of soybean farming in the Brazilian Cerrado. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia urbana e ambiental) - Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BOMBARDI, L. M. **Geografia do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia**. São Paulo: FFLCH - USP, 2017. 296p. ISBN: 978-85-7506-310-1.

BRASIL. Lei nº 7.802 de 11 de julho de 1989. **Diário oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 12 julho 1989. Seção 1, p. 11459.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 03, de 16 de janeiro de 1992**. Brasília, DF, 1992.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Portaria normativa nº 84, de 15 de outubro de 1996**. Brasília, DF, 1996.

BRASIL. **Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002**. Presidência da república, Casa Civil, 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, DF, 2005.

CARNEIRO, F. F.; AUGUSTO, L. G. S.; RIGOTTO, R. M.; FRIEDRICH, K; BÚRIGIO, A. C. **Dossiê abrascos**: Um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde. Rio de Janeiro: EPSJV e São Paulo: Expressão Popular, 2015. 628p.

CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment. **Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life**. Canadian, 2013. Disponível em: < <http://st-ts.ccme.ca> >. Acesso em abril de 2018.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products**. Delft, the Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, 2003. 202p.(Value of Water Research Report Series, n. 13).

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y.; SAVENIJE, H. **Saving water through global trade**. Delft, the Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, 2005. 40p. (Value of Water Research Report Series, n. 17).

CHAPAGAIN, A.K., HOEKSTRA, A.Y.; SAVENIJE, H.H.G. Water saving through international trade of agricultural products. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 10, p. 455 - 468, 2006.

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, p. 1-10, 2015. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2015132-6057>.

- COLTRO, L.; KARASKI, T. U. Pegada hídrica: do conceito à normatização. Informativo CETEA, **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens**, v.27, n.1, 2015. ISSN 2175-5000.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Perfil do setor de açúcar e do álcool no Brasil**. Brasília: 2013. (Volume 5 – safra 2011/2012).
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**. Brasília: 2016. 82p. (Volume 3 – safra 2016/2017, n.4).
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**. Brasília: 2018. 76p. (Volume 5 - safra 2018/2019, n.2).
- CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de águas e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF.
- COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural capital and sustainable development. **Conservation Biology**, v.6, n.1, p.37–46, 1992.
- CPRH (Agência estadual de meio ambiente). **Diagnostico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco**, Recife, p. 214, 2003. Disponível em: < www.cprh.pe.gov.br/central_servicos/centro_documentacao_informacao_ambiental/central_downloads/39749%3B34001%3B020709%3B0%3B0 > Acesso fevereiro de 2018.
- CURI, D. **Gestão Ambiental**. São Paulo: Pearson, 2011. 312p. ISBN: 978-85-7605-698-0
- DE FRAITURE, C.; WICHELNS, D.; ROCKSTRÖM, J.; KEMP-BENEDICT, E.; ERIYAGAMA, N.; GORDON, L.J.; HANJRA, M.A.; HOOGEVEEN, J.; HUBER-LEE, A.; KARLBERG, L. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches. In: Molden, D. (Org.). **Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture**. London: Earthscan, International Water Management Institute, 2007, p. 91–145.
- DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens landsat-5. **Raega**, Curitiba, v.21, p.234-271, 2011.
- DEURER, M., GREEN, S. R., CLOTHIER, B. E., MOWAT, A. Can product water footprints indicate the hydrological impact of primary production? – A case study os New Zealand kiwifruit. **Journal of Hidology**, v. 408, p. 246- 256, 2011.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requeriments**. Rome: FAO, 1977. 179p. (Irrigation and Drainage, paper. 24).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (Irrigation and Drainage, paper 33).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994, 306p. (Irrigação e Drenagem, 33)

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P.; PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. s tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015.

Confins [Online], v. 37, 2018. DOI: 10.4000/confins.15738

EL-SADEK, A. Virtual water trade as a solution for water scarcity in Egypt. **Water Resources Management**, v. 24, p. 2437-2448, 2010.

EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo). **Manejo integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas, Minas Gerais: 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo, documentos 30).

EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisa de Solos). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: SPI, 2006. 412 p.

EMPINOTTI, V. L.; TADEU, N. D.; MARTINS, R. S. L. Análise crítica da Pegada Hídrica cinza na produção de celulose. **Ambiente e Água**, v. 8, n. 3, p. 166-177, 2013.

EPA (Environmental Protection Agency). **Drinking water health advisory: pesticides**. Chelse United States Environmental Protection Agency, Office of Drinking Water Health Advisories: Lewis Publishers, 1989. 819 p. ISBN: 0-87371-235-8

ERCIN, A. E.; ALDAYA, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Corporate Water Footprint Accounting and Impact Assessment: The Case of the Water Footprint of a Sugar-Containing Carbonated Beverage. **Water Resour Manage**, v.25, p.721-741, 2011.

ERCIN, A. E.; ALDAYA, M. M.; HOEKSTRA. The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. **Ecological Indicators**, v.18, p.392-402, 2012.

EU - Official Journal of the European Union. **Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council**. European Union, Brussels: 2013.17p.

FAGUNDES, E. A. A. **Pegada hídrica como indicador do uso sustentável da água em área agrícola, no Alto Rio São Lourenço - MT**. 2016. 115f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2016.

FALKENMARK, M.; ROCKSTROM, J. **Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology**. Londres: Earthscan, 2004. 247 p. ISBN: 1-85383-927-2.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. 505p. (Irrigation and Drainage, paper 66).

FARRAN, A.; CHENTOUF, A. Study of the behaviour of azinphos-methyl in a clay mineral by batch and column leaching. **Journal of Chromatography** , v. 869, p. 481-485, 2000.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

FRANKE, N. A.; BOYACIOGLU, H.; HOEKSTRA, A. Y. **Grey water footprint accounting – Tier 1 Supporting Guidelines**. Delft, The Netherlands: UNESCO –IHE, 2013. 64p. (Value of Water Research Report Series, n.65).

FREITAS, S. C.; CHAVES, H. M. L. Estimativa da pegada hídrica cinza relativa ao fósforo na bacia hidrográfica do ribeirão Pípiripau (DF/GO). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.19, n. 3, p.141-149, 2014.

GALLOWAY, J.; BURKE, M.; BRADFORD, G. E.; NAYLOR, R.; FALCON, W.; CHAPAGAIN, A. K.; GASKELL, J. C.; MCCULLOUGH, E.; MOONEY, H. A.; OLESON, K. L. L.; TEINFELD, H.; WASSENAAR, T.; SMIL, V. International trade in meat: the tip of the pork chop. **Ambio** v.36, p.622–629, 2007.

GERBENS-LEENS, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. **The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize**. Delft: UNESCO - IHE, 2009. 44p. (Value of Water Research Report Series, n 38)

GIACOMIN, G. S.; JUNIOR OHNUMA, A. A. Análise de resultados de pegada hídrica por países e produtos específicos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.8, p. 1562-1572, 2012. e-ISSN: 2236-1170.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010

GOBIN, A.; KERSEBAUM, K. C.; EITZINGER, J.; TRNKA, M.; HLAVINKA, P.; TAKÁČ, J.; KROES, J.; VENTRELLA, D.; MARTA, A. D.; DEELSTRA, J.; LALIĆ, B.; NEJEDLIK, P.; ORLANDINI, S.; PELTONEN-SAINIO, P.; RAJALA, A.; SAUE, T.; ŞAYLAN, L.; STRIČEVIC, R.; VUČETIĆ, V.; ZOUMIDES, C. Variability in the Water Footprint of Arable Crop Production across European Regions. **Water**, v.9, n.93, p. 2-22, 2017.

GONÇALVES, C. de F.; CORREA, S. R. S.; RODRIGUES, L. B.; NETO ALMEIDA, J. A. Pegada de Carbono do ciclo de vida da celulose de eucalipto: estudo de caso numa empresa baiana. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 4, 2018.

HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P.Q. **Virtual water trade**: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Delft, The Netherlands: IHE Delft, 2002. 120p. (Value of Water Research Report Series, n. 11)

HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water trade**: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Delft: UNESCO-IHE, 2003a. 239p. (Value Water Research Report Series, n.12).

HOEKSTRA, A. Y. Virtual water trade between nations: A global mechanism affecting regional water systems. **IGBP International Geosphere-Biosphere programe**, n. 54, p. 2-4, 2003b.

HOEKSTRA, A. Y.; HUNG, P. Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. **Global Environmental Change**, 15,p 45-56, 2005.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. **Water resources Management**, v. 21, n. 1, p.35-48, 2007a.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. The water footprints of morocco and the netherlands: global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. **Ecological economics**, v.64, p. 143-151, 2007b.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. **Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources**. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2008. 220p. ISBN:978-1-4051-6335-4 .

HOEKSTRA, A. Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. **Ecological Economics**, v.68, p.1963-1974, 2009

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **Water Footprint Manual: State of the Art**. Ensched: Water Footprint Network, 2009.131p.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London and Washington: Earthscan, 2011. 224p. ISBN: 978-1-84971-279-8.

HOEKSTRA, A. Y.; MEKONNEN, M. M.; CHAPAGAIN, A. K.; MATHEWS, R. E.; RICHTER, B. D. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. **Plos One**, v. 7, n.2, 2012.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. Brasil, 2017. (Boletins anuais de produção, importação, exportação e vendas de agrotóxicos no Brasil, boletim 2017). Disponível em < <https://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais> > . Acesso em outubro de 2018.

INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) . **Portail Substances Chimiques**: Normes de qualité environnementale et valeurs Guides environnementales. [S.l.]: 2015. Disponível em: < <http://www.ineris.fr/substances/fr/page/9> > . Acesso em novembro 2016.

ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). **ISO 14044**: Environmental management: Life cycle assessment: requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, 2006, 46p.

_____. **ISO 14046**: Environmental management: Water Footprint: principles, requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, 2014, 48p.

JORRAT, M. M.; ARAUJO, P. Z.; MELE, F. D. Sugarcane water footprint in the province of Tucumán, Argentina Comparison between different management practices. **Journal of Cleaner Production**, v.188, p. 521 - 529, 2018.

KONGBOON, R.; SAMPATTAGUL, S. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 40, p.451-460, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.215>.

LEAL, A. P. P. N.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Pegada Hídrica na bacia hidrográfica do Rio Itapemirim. **Revista scientia agrária**, Curitiba, v.19, n.2, p. 100-111, 2018.

LEITE, A. P.; SANTOS, G. R.; SANTOS, J. E.O. Análise temporal dos índices de vegetação NDVI e SAVI na estação experimental de Itatinga utilizando imagens Landsat 8. **Revista brasileira de energias renováveis**, v.5, n.4, p. 606-623, 2017.

LIU, W. T. H. Estimativa da biomassa através do índice de vegetação obtido via satélite.

Boletim IG-USP, São Paulo, n.6, 1989. Disponível em : <

<https://doi.org/10.11606/issn.2317-8078.v0i6p103-104> >. Acesso em agosto de 2016.

LIU, C.; KROEZE, C.; HOEKSTRA, A. Y.; GERBENS-LEENES, W. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. **Ecological Indicators**, v.18, p. 42 -49, 2012.

LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Estudo da variabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada/ NDVI, utilizando Krigagem Indicativa. **Holos Ambiental**, v.4, p. 38-55, 2004.

MACHADO NETO, J. G. **Ecotoxicologia de agrotóxicos**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 491p.

MAGALHÃES, A. C. N. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta**. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. Ecofisiologia da produção. Campinas: POTAFOS, 1987. 249p.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Balanco nacional de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: MAPA/SPA, 2007.139p.

MARACAJÁ, K. F. B.; SILVA, V. de P. R.; NETO, J. D.; ARAÚJO, L. E. de. Pegada Hídrica como Indicador de Sustentabilidade Ambiental. **Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, v.2, n.2,ed. Especial, p. 113-125, 2012.

MARACAJÁ, K. F. B.; SILVA, V. de P. R.; NETO, J. D. Pegada Hídrica dos consumidores vegetarianos e não vegetarianos. **Qualitas Revista Eletrônica**, v.14, n.1, 2013.

MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E.; SILVA, V. de P. R. Regionalização da Pegada Hídrica do Estado da Paraíba. **Reunir**, v. 14, n. 1,p.105-122, 2014.

MARACAJÁ, K. F. B. Modelo integrado das pegadas hídrica, ecológica e de carbono para o monitoramento da pressão humana sobre o planeta. **Revista Espacios**, v.37, n.17, p.21, 2016

MARTINS, R. de S. L. **Empresas e gestão da água: uma abordagem a partir do uso do indicador pegada hídrica**.2014.178f. Tese (doutorado em ciência ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MARZULLO, R. C. M.; MATAI, P. H. L. S. Desafios Metodológicos para a Governança da Água Através do Monitoramento da Pegada Hídrica. In: Congresso Internacional de Governança da Água, 3., 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2011. p.1-17.

MATOS, R. M.; BORGES, V. E.; LIMA, A. S.; SILVA, P. F.; DANTAS NETO, J.; LIMA, V. L. A. Sustainability of the grey water footprint (GWF) for cultivation of onion in the Brazilian semi-arid regions. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n. 6, p.749 -756, 2017.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.15, p.1577-1600, 2011.

MEKONNEN M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Global grey water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. **Environmental Science & Technology**, v.49, n.21, p.12860-12868, 2015.

MENDONÇA, M. F. de. **Crescimento e produção de cana-de-açúcar cultivada sob sistema irrigado**. 2013. 49f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

MIGUEL, A. de; HOEKSTRA, A. Y.; GARCÍA-CALVO, E. Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry. **Ecological Indicators**: n. 57, p.465-474, 2015

MMA (Ministério do meio ambiente). **Painel Nacional de Indicadores ambientais**, Referencial teórico , composição e síntese dos indicadores. Brasília: SINIMA/DGE, 2014.107p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivos/Banner/banner_pnia_2012.pdf>. Acessado em setembro de 2017.

MONTANHER, O. C.; FRAGAL, E. H. Aplicação de dados radiométricos TM5 na análise da vegetação após incêndio em área alagável e relação com a geomorfologia. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 65, p.111- 122, 2013.

MÜLLER, G. T. **Emprego da Pegada Hídrica e da análise de ciclo de vida para a avaliação do uso da água na cadeia produtiva do biodiesel de soja**. 2012.188f. Dissertação (mestrado em recursos hídricos e saneamento ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MUSETTI, R. A. **Bacias hidrográficas no Brasil**: aspecto jurídico-ambiental. **CEJ**, Brasília, n. 12, p. 90-94, 2000.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Soil and water quality: an agenda for agriculture**. Committee on Long-Range Soil and Water Conservation, Board on Agriculture, National Academy Press, Washington, D.C., USA., 1993. ISBN: 978-0-309-04933-7.

NÓBREGA, R. S.; FARIAS, R. F. de L.; SANTOS, C. A. C. dos. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.2, p.171 - 180, 2015.

OLIVEIRA, J. S. e S. **Índices de vegetação (NDVI, IVAS, IAF, NDWI) como subsídio à gestão do uso e ocupação do solo na zona de amortecimento da Reserva Biológica de Saltinho, Pernambuco**.2013. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geográficas) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

- OMETTO, J. C. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar**. 1ºed. Piracicaba: ESALQ, 1980. 17p.
- ORGERON, A. J.; PETRIE, E. C.; GRAVIOS, K. A. Sugarcane response to glyphosate ripener when mixed with 2,4-d or atrazine. **Journal American Society of Sugar Cane Technologists**, v.37, p. 13-21, 2017.
- PATTON, **Michael Quinn**. **Qualitative research & evaluation methods**. Los Angeles: Sage Publications, 2015.
- PEDEN, D.; TADESSE, G.; MISRA, A. K.; AHMED, F. A.; ASTATKE, A.; AYALNEH, W.; HERRERO, M.; KIWUWA, G., KUMSA, T.; MATI, B.; MPAIRWE, D.; WASSENAAR, T.; YIMEGNUHAL, A. Water and livestock forhumandevlopment. In: Molden, D. (Ed.). **Water for food, water for life: a comprehensive ssesment of water management in agriculture**. London: International Water Management Institute, Colombo, Earthscan, 2007. p. 485–514,
- PELLICER-MARTÍNEZ, F.; MARTÍNEZ-PAZ, J. M. The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. **Science of the Total Environment**, v. 571, p.561 - 574, 2016.
- PERES, F.; MOREIRA, J. C.; DUBOIS, G. S. Agrotóxicos, saúde e ambiente: uma introdução ao tema. In: PERES, F.; MOREIRA, J. C. (Org.). **É veneno ou é remédio? agrotóxicos, saúde e ambiente** [online]. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 2003. p. 21-41. ISBN 85-7541-031-8.
- PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A . N. S.; LARA, S. S.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. C.; PIGNATTI, M. G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência e saúde coletiva**, v. 22 n. 10, p.3281 - 3293, 2017.
- POLITANO, W.; PISSARRA, T.C.T. Relações entre características morfométricas quantitativas e estimativas da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2ª ordem de magnitude. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p.179-186, 2003.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.
- PPDB(pesticide properties database). **The PPDB**. Hertfordshire: University of Hertfordshire, 2018. Disponível em: <<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>>. Acesso em fevereiro de 2018.
- RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2004.
- ROCHA, S. R. **A balança comercial e as transferências de água virtual: análise do setor agrícola no Ceará**. 2014. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis**. 2005. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J; A.; DEERING, D. W . Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington: NASA. Goddard Space Flight Center, v.1, p.309-317, 1973. (NASA SP-351).

SANTIAGO, A. D.; CHICO, D.; ANDRADE JUNIOR, A. S. A.; GARRIDO, A.; CARNAÚBA, P. J. P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p. 209-216, 2017.

SANTOS, M. A. L. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 100f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B (Org.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação CARGIL, 1987, v.117, p.373-431.

SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T. A. D.; CORRÊA, S. T. R.; KOLLN, O. T.; GAVA, G. J. C.; SANTOS, L. N.S.; VICTORIA, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p. 4576 - 4584, 2015.

SCHOLTEN, W. **The water footprint of sugar and sugar-based ethanol**. 2009. 148f. Thesis report (Doctorate in Civil Engineering and Management) - University of Twente, The Netherlands, 2009.

SECTMA/PE (Secretaria de ciência, tecnologia e meio ambiente de Pernambuco). **PERH- PE (Plano Estadual de Recursos Hídrico. Secretaria de Ciência, tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco)**. Recife, v. 1, p. 223, 1998. Disponível em : < <http://www.srhe.pe.gov.br/attachments/article/458/volume1.pdf> >

SEIXAS, V. S. C. **Análise da Pegada Hídrica de um Conjunto de Produtos Agrícolas**. 2011.110f. Dissertação (mestrado em engenharia do ambiente) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Revista Ambiente e Sociedade**, Campinas, v. x, n.2, p. 137-148,2007.

SILVA, E. T. da; SOUZA, E. P. de; SANTOS, R. da S.; BARBOSA, M. S. A engenharia genética aplicada no melhoramento da cana-de-açúcar: uma nova alternativa para a produção de biodiesel de segunda geração. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v.9, n.2, p.03-23, 2011.

SILVA, V. de P. R. da; ALEIXO, D. de O.; DANTAS NETO, J.; MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E. de. Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada Hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.100-105, 2013.

SILVA, A. L. B. de O. **Produção e eficiência no uso da água de quatro cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial em Campinas, SP**. 2014. 45f. Dissertação (Mestrado em agricultura tropical e subtropical) - Instituto Agrônômico, Campinas, SP, 2014.

SILVA, V.de P. R.da; BORGES, C. J. R.; ALBUQUERQUE, W. G. de. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 625-632, 2014 .

SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I.; SOUZA, J. L.; LIRA, G. B.; SANTO, A. L. Demanda hídrica irrigada por gotejamento nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n.9, 2015.

SILVA, V. de P. R. da; ALBUQUERQUE, M. F. de; ARAÚJO, L. E. de; CAMPOS, J. H. B. da C.; GARCÊZ, S. L. A.; ALMEIDA, R. S. R. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.6, p. 521 – 526, 2015.

SILVA, V.de P. R.da; OLIVEIRA, S. D.de; HOEKSTRA, A. Y.; DANTAS NETO, J.; CAMPOS, J. H. B.C. ; BRAGA, C. C.;ARAÚJO, L. E. de; ALEIXO, D. de O.; BRITO, J. I. B. de; SOUZA, M. D. de; HOLANDA, R. M. de. Water Footprint and Virtual Water Trade of Brazil. **Water**, v.8 (11), 517, 2016.

SILVA, G. M. **Uso de *Cotesia Flavipes* (cam.) no controle de *diatraea saccharalis*,(fabr.) em cana-de-açúcar na zona da mata norte de Pernambuco**. 2018. 31f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2018.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. de; ROCHA, A. T. da; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. dos S.; NASCIMENTO, C. W. A. do. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.4, p. 347-354, 2012.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, n.1, p. 91-97, 2006.

SOUSA JÚNIOR, W. C. D.; VIEIRA, B. C. Pegada hídrica como indicador: concepções e crítica metodológica. In: JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V. **Pegada hídrica: inovação, corresponsabilização e os desafios de sua aplicação**. São Paulo: Annablume, 2012. p. 45 - 62.

SOUZA, M. T. S. de; RIBEIRO, H. C. M. Sustentabilidade Ambiental: uma Meta-análise da Produção Brasileira em Periódicos de Administração. **Revista de Administração Contemporânea**, Rio de Janeiro, v.17, n.3, p.368-396, 2013.

SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 1.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 196 p.

STEINFELD, H.; GERBER, P.; WASSENAAR, T.; CASTEL, V.; ROSALES, M.; DE HAAN, C. 2006. **Livestock's long shadow: environmental issues and options**. Rome: Food and Agriculture Organization, 2006. 416p. ISBN: 978-92-5-105571-7.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n. 20, p. 137-156, 2007.

THORBURN, P. J.; DART, I. K.; BIGGS, I. M.; BAILLIE, C. P.; SMITH, M. A.; KEATING, B. A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, New York, v. 22, n. 1, p. 201-209, 2003.

TOLEDO, P. H. de O.; OLIVEIRA, A. M. de; BARROS, A. M. de; FREIRE, C. C. Efeito da pegada hídrica da cana-de-açúcar: sustentabilidade hídrica em bacia hidrográfica. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXI, 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, 2015.

TOMAZ, P. **Critério unificado para manejo das águas pluviais em áreas urbanas**. [S.I.]: 2007. cap. 15. 323p. ISBN: 85-905933-3-9. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livro02v3critério_unificado.pdf> Acesso em 10 ago. 2018.

UNEP: **Water footprint and corporate water accounting for resource efficiency**, United Nations Environment Programme, Paris, available at (2011). Disponível em:<<http://www.waterfootprint.org/Reports/UNEP-2011.pdf>> Acesso em 13 de out. 2016.

VAN OEL, P. R.; MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A.Y. **The External Water Footprint of the Netherlands: Quantification and Impact Assessment**. Delf: UNESCO -IHE, 2008. 72p. (Value of Water Research Report Series, n. 33).

VELÁZQUEZ, E.; MADRID, C.; BELTRÁN, M. J. Rethinking the concepts of virtual water and water footprint in relation to the production-consumption binomial and the water-energy nexus. **Water Resources Management**, v. 25, p. 743-761, 2011.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. **Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth**. Philadelphia, PA: New Society Publishers, 1996. 160 p

WICHELNS, D. Virtual Water: A Helpful Perspective but not a Sufficient Policy Criterion. **Water Resource Management**, v. 24, p. 2203-2219, 2010.

WWWAP (World Water Assessment Programme). **Water in a Changing World**. Paris and Londres: UNESCO and Earthscan, 2009. 429p. (The United Nations World Water Development Report 3)

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista Administração Pública**, v. 27, n.2, p.5-18, 1993.

ZENG, Z.; LIU, J.; KOENEMAN, P. H.; ZARATE, E. e HOEKSTRA, A. Y. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. **Hydrology and Earth System Sciences**, n.16, p.2771–2781, 2012.

APÊNDICE A

(Médias das vazões máxima, mínima e média, para primeira, segunda safra e série histórica)

MÉDIAS DAS VAZÕES DE 2000 - 2017			
Data Mês/Ano	Máxima mensal	Mínima mensal	Média mensal
01/2000	42,13	0	6
02/2000	14,02	0	2,08
03/2000	3,81	0,18	1,08
04/2000	12,2	0,39	4,22
05/2000	51,72	0,01	10,6
06/2000	463,64	0,15	97,58
07/2000	323,11	1,35	59,45
08/2000	236,02	6,63	45,73
09/2000	158,31	1,83	40,82
10/2000	20,53	2,99	9,85
11/2000	21,27	2,38	8,95
12/2000	16,37	1,83	5,53
01/2001	7,32	0,2	2,61
02/2001	1,13	0	0,43
03/2001	17,03	0,31	7,71
04/2001	8,78	0,11	3,88
05/2001	9,29	0,04	3,57
06/2001			22,1
07/2001	153,09	3,48	31,97
08/2001	12,32	2,99	6,01
09/2001	44,08	1,35	5,44
10/2001	6,41	1,13	2,03
11/2001	2,1	0,58	0,96
12/2001	1,58	0,51	0,87
01/2002	40,61	0,75	9,22
02/2002	3,65	0,66	1,8
03/2002	24,31	0,58	4,6
04/2002	3,31	0,66	1,53
05/2002	25,1	1,47	3,97
06/2002	151,36	2,1	28,9
07/2002	255,77	5,67	32,12
08/2002	19,44	3,43	6,58
09/2002	3,77	1,69	2,69
10/2002	6,53	1,34	2,09
11/2002	3,1	0,66	1,34
12/2002	2,07	0,5	0,99
01/2003	1,94	0,25	0,67
02/2003	41,68	0,58	4,38
03/2003	88,06	1,23	11,79
04/2003	41,68	1,12	5,29
05/2003	36,94	1,94	9,13
06/2003	282,81	1,94	29,4
07/2003	75,1	5,67	21,87
08/2003	11,26	3,26	5,01
09/2003	22,7	2,21	4,81
10/2003	2,21	1,45	1,7
11/2003	1,45	0,74	1,09
12/2003	2,79	0,36	0,86

Data Mês/ano	Máxima mensal	Mínima mensal	Média mensal
01/2004	185,44	0,83	17,55
02/2004	420,28	8,58	56,41
03/2004	32,14	4,94	11,55
04/2004	121,62	5,29	15,63
05/2004	81,46	8,58	30,01
06/2004	270,98	13,54	66,26
07/2004	520,28	24,17	80,32
08/2004	29,53	11,04	18,97
09/2004	13,25	8,58	10,82
10/2004	10,02	4,94	6,82
11/2004	5,29	3,51	4,37
12/2004	3,96	3,22	3,57
01/2005	3,8	2,82	3,37
02/2005	9,04	3,09	4,08
03/2005	12,4	2,82	4,19
04/2005	8,12	3,36	4,05
05/2005	38,59	2,69	9,67
06/2005	348,71	43,99	105,84
07/2005	46,02	6,83	17,28
08/2005	200,46	7,9	21,95
09/2005	11,57	4,77	7,49
10/2005	6,23	3,51	4,29
11/2005	4,11	3,36	3,62
12/2005	3,65	2,82	3,27
01/2006	3,8	2,44	2,87
02/2006	9,77	2,32	3,03
03/2006	9,28	1,78	3,65
04/2006	23	2,32	4,87
05/2006	40,52	2,32	5,47
06/2006	183,97	2,21	23,6
07/2006	17,28	3,8	7,03
08/2006	21,87	2,95	6,75
09/2006	4,11	2,57	3,18
10/2006	2,69	2,1	2,19
11/2006	5,47	1,88	2,52
12/2006	2,69	1,68	2,21
01/2007	6,83	1,88	3,2
02/2007	12,12	1,3	3,16
03/2007	251,27	2,21	17,72
04/2007	84,06	1,48	10,5
05/2007	24,17	2,44	7,03
06/2007	175,95	6,04	45,61
07/2007	33,48	4,43	13,92

Data Mês/Ano	Máxima mensal	Mínima mensal	Média mensal	Data Mês/Ano	Máxima mensal	Mínima mensal	Média mensal
08/2007	23,39	4,27	8,85	03/2011	26,59	5,35	5,9
09/2007	85,38	3,22	11,92	04/2011	7,95	6,78	12,64
10/2007	3,8	2,32	2,86	05/2011	569,22	17,59	112,58
11/2007	2,44	1,99	2,25	06/2011	146,95	9	28,83
12/2007	2,82	1,88	2,17	07/2011	453,51	28,25	126,28
01/2008	7,68	1,88	3,28	08/2011	219,45	10,59	26,79
02/2008	3,96	1,88	2,31	09/2011	8,16	6,04	9,53
03/2008	47,05	1,88	7,65	10/2011	6,04	5,02	4,28
04/2008	34,85	3,36	9,37	11/2011	3,67	0	0,82
05/2008	84,06	3,36	18,19	12/2011	5,02	2,89	3,38
06/2008	85,38	3,8	16,02	01/2012	43,48	2,53	8,22
07/2008	82,76	5,47	23,97	02/2012	122,38	3,01	10,38
08/2008	145,31	5,12	23,35	03/2012	4,25	2,53	3,08
09/2008	19,68	2,69	5,16	04/2012	3,27	1,6	2,38
10/2008	3,22	1,88	2,6	05/2012	12,55	1,51	3,57
11/2008	2,69	1,39	1,89	06/2012	179,5	3,14	21,53
12/2008	1,68	1,13	1,39	07/2012	166,33	3,95	26,13
01/2009	1,68	1,13	1,32	08/2012	4,55	2,53	3,38
02/2009	340,58	1,3	21,02	09/2012	3,27	1,69	2,27
03/2009	98,27	2,1	9,41	10/2012	5,69	1,69	2,25
04/2009	151,91	2,21	13,49	11/2012	1,79	1,18	1,52
05/2009	146,12	4,94	33,18	12/2012	1,69	0,58	1,08
06/2009	92,07	5,87	25,29	01/2013	3,01	0,58	1,7
07/2009	207,03	7,35	49,8	02/2013	3,95	0,42	1,42
08/2009	151,91	7,35	28,79	03/2013	3,14	0,52	1,3
09/2009	10,12	4,4	6,41	04/2013	92,07	0,52	12,31
10/2009	4,25	2,77	3,32	05/2013	123,91	2,53	11,92
11/2009	8,16	2,77	3,51	06/2013	284,81	3,01	45,79
12/2009	3,27	2,31	2,71	07/2013	237,13	6,04	46,44
01/2010	5,02	2,31	4,04	08/2013	73,85	4,86	11,5
02/2010	8,16	3,27	4,65	09/2013	35,77	3,27	8,61
03/2010	12,05	2,53	3,94	10/2013	4,25	2,09	2,71
04/2010	12,55	3,27	4,9	11/2013	6,96	1,34	2,47
05/2010	4,86	2,42	3,3	12/2013	3,53	1,1	1,47
06/2010	174,18	2,53	18,09	01/2014	5,02	1,02	2,05
07/2010	16,69	4,4	8,74	02/2014	14,14	0,88	3,68
08/2010			8,58	03/2014	5,52	1,02	2,17
09/2010	6,59	2,89	3,79	04/2014	4,4	0,75	1,41
10/2010	3,27	2,2	2,62	05/2014	15,24	1,69	4,11
11/2010	2,77	0	1,04	06/2014	22,23	1,89	6,49
12/2010	7,55	2,09	3,55	07/2014	20,75	2,31	5,03
01/2011	20,75	2,53	5,86	08/2014	11,06	2,31	4,1
02/2011	30,82	2,53	5,84	09/2014	70,16	1,99	14,64

Data Mês/Ano	Máxima mensal	Mínima mensal	Média mensal				
10/2014	5,52	1,34	2,62	04/2016	291,74	0,29	25,66
11/2014	1,79	0,95	1,28	05/2016	184,85	1,37	34,46
12/2014	1,69	0,63	1,06	06/2016	45,91	1,04	9,93
01/2015	0,79	0	0,35	07/2016	4,68	0,5	1,96
02/2015	3,07	0	0,43	08/2016	0,94	0,01	0,2
03/2015	52,1	0,84	10,43	09/2016	0,66	0	0,2
04/2015	2,59	0	0,51	10/2016	0	0	0
05/2015	1,49	0	0,09	11/2016	0,57	0	0,14
06/2015	45,91	0,57	4,8	12/2016	0,5	0	0,08
07/2015	122,2	2,99	31,83	01/2017	0,42	0	0,09
08/2015	34,07	1,49	9,11	02/2017	1,37	0,01	0,41
09/2015	1,56	0,42	0,73	03/2017	31,88	0	4,64
10/2015	0,57	0,04	0,26	04/2017	100,99	0,03	7,15
11/2015	0,05	0	0	05/2017	50,52	0	9,1
12/2015	50,52	0	4,89	06/2017	11,12	0,66	4,29
01/2016	70,78	0,66	12,99	07/2017	254,04	1,88	37,12
02/2016	7,26	0,13	1,63	08/2017	16,93	1,15	4,05
03/2016	31,88	0,18	4,59	09/2017	1,15	0,13	0,55
				10/2017	0,42	0	0,14
				média	59,8995	2,84	11,72

APÊNDICE B

(Análise de frequência para a Q_{90} da série histórica de 2000 a 2017).

Ordem	Ordem	
	P= 100 X m/(214+1)	Decrescente (m ³ /s)
Ordem	P	Q(m ³ /s)
1	0,47	126,28
2	0,93	112,58
3	1,40	105,84
4	1,86	97,58
5	2,33	80,32
6	2,79	66,26
7	3,26	59,45
8	3,72	56,41
9	4,19	49,8
10	4,65	46,44
11	5,12	45,79
12	5,58	45,73
13	6,05	45,61
14	6,51	40,82
15	6,98	37,12
16	7,44	34,46
17	7,91	33,18
18	8,37	32,12
19	8,84	31,97
20	9,30	31,83
21	9,77	30,01
22	10,23	29,4
23	10,70	28,9
24	11,16	28,83
25	11,63	28,79
26	12,09	26,79
27	12,56	26,13
28	13,02	25,66
29	13,49	25,29
30	13,95	23,97
31	14,42	23,6
32	14,88	23,35
33	15,35	22,1
34	15,81	21,95
35	16,28	21,87
36	16,74	21,53
37	17,21	21,02
38	17,67	18,97
39	18,14	18,19
40	18,60	18,09
41	19,07	17,72
42	19,53	17,55
43	20,00	17,28
44	20,47	16,02
45	20,93	15,63
46	21,40	14,64
47	21,86	13,92
48	22,33	13,49
49	22,79	12,99
50	23,26	12,64
51	23,72	12,31
52	24,19	11,92
53	24,65	11,92
54	25,12	11,79
55	25,58	11,55
58	26,98	10,6

Ordem	P	Q(m ³ /s)
59	27,44	10,5
60	27,91	10,43
61	28,37	10,38
62	28,84	9,93
63	29,30	9,85
64	29,77	9,67
65	30,23	9,53
66	30,70	9,41
67	31,16	9,37
68	31,63	9,22
69	32,09	9,13
70	32,56	9,11
71	33,02	9,1
72	33,49	8,95
73	33,95	8,85
74	34,42	8,74
75	34,88	8,61
76	35,35	8,58
77	35,81	8,22
78	36,28	7,71
79	36,74	7,65
80	37,21	7,49
81	37,67	7,15
82	38,14	7,03
83	38,60	7,03
84	39,07	6,82
85	39,53	6,75
86	40,00	6,58
87	40,47	6,49
88	40,93	6,41
89	41,40	6,01
90	41,86	6
91	42,33	5,9
92	42,79	5,86
93	43,26	5,84
94	43,72	5,53
95	44,19	5,47
96	44,65	5,44
97	45,12	5,29
98	45,58	5,16
99	46,05	5,03
100	46,51	5,01
101	46,98	4,9
102	47,44	4,89
103	47,91	4,87
104	48,37	4,81
105	48,84	4,8
106	49,30	4,65
107	49,77	4,64
108	50,23	4,6
109	50,70	4,59
112	52,09	4,29
113	52,56	4,29
114	53,02	4,28
115	53,49	4,22
116	53,95	4,19
117	54,42	4,11
118	54,88	4,1
119	55,35	4,08

Ordem	P	Q(m ³ /s)
120	55,81	4,05
121	56,28	4,05
122	56,74	4,04
123	57,21	3,97
124	57,67	3,94
125	58,14	3,88
126	58,60	3,79
127	59,07	3,68
128	59,53	3,65
129	60,00	3,62
130	60,47	3,57
131	60,93	3,57
132	61,40	3,57
133	61,86	3,55
134	62,33	3,51
135	62,79	3,38
136	63,26	3,38
137	63,72	3,37
138	64,19	3,32
139	64,65	3,3
140	65,12	3,28
141	65,58	3,27
142	66,05	3,2
143	66,51	3,18
144	66,98	3,16
145	67,44	3,08
146	67,91	3,03
147	68,37	2,87
148	68,84	2,86
149	69,30	2,71
150	69,77	2,71
151	70,23	2,69
152	70,70	2,62
153	71,16	2,62
154	71,63	2,61
155	72,09	2,6
156	72,56	2,52
157	73,02	2,47
158	73,49	2,38
159	73,95	2,31
160	74,42	2,27
161	74,88	2,25
162	75,35	2,25
163	75,81	2,21
164	76,28	2,19
165	76,74	2,17
166	77,21	2,17
167	77,67	2,09

Ordem	P	Q(m ³ /s)
167	77,67	2,09
168	78,14	2,08
169	78,60	2,05
170	79,07	2,03
171	79,53	1,96
172	80,00	1,89
173	80,47	1,8
174	80,93	1,7
175	81,40	1,7
176	81,86	1,63
177	82,33	1,53
178	82,79	1,52
179	83,26	1,47
180	83,72	1,42
181	84,19	1,41
182	84,65	1,39
183	85,12	1,34
184	85,58	1,32
185	86,05	1,3
186	86,51	1,28
187	86,98	1,09
188	87,44	1,08
189	87,91	1,08
190	88,37	1,06
191	88,84	1,04
192	89,30	0,99
193	89,77	0,96
194	90,23	0,87
195	90,70	0,86
196	91,16	0,82
197	91,63	0,73
198	92,09	0,67
199	92,56	0,55
200	93,02	0,51
201	93,49	0,43
202	93,95	0,43
203	94,42	0,41
204	94,88	0,35
205	95,35	0,26
206	95,81	0,2
207	96,28	0,2
208	96,74	0,14
209	97,21	0,14
210	97,67	0,09
211	98,14	0,09
212	98,60	0,08
213	99,07	0
214	99,53	0

APÊNDICE C

(Fração de lixiviação/escoamento - α , para as safras)

Tabela 29: Fração de lixiviação/escoamento (α) para a safra 2016/2017.

Agrotoxico	α
2,4- D Amina	0,0467
Ametrina	0,0484
Dicloreto de paraquate	0,0467
Diuron	0,0434
Etripole	0,0517
Glifosato	0,0317
Hexazinona	0,0601
Isoxaflutol	0,0401
Metribuzim	0,0517
MSMA	0,0467
Tebutiurum	0,0601

Fonte: Elaboração própria (2019)

Tabela 30: Fração de lixiviação/escoamento (α) para a safra 2017/2018.

Agrotóxico	α
2,4- D Amina	0,0467
Ametrina	0,0484
Dicloreto de Paraquate	0,0467
Glifosato	0,0317
Imazapique	0,0601
Isoxaflutol	0,0401
Metribuzim	0,0517
Picloram	0,0634

Fonte: Elaboração própria (2019)