PROPOSTA DE INTRODUÇÃO DO NEXO DA ÁGUA COM ENERGIA E USO DO SOLO DENTRO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO INTEGRADA BRASILEIRO

Rebeca Tricarico Orosco

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético e Ambiental, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético e Ambiental.

Orientador(es): Alexandre Salem Szklo e André Frossard Pereira de Lucena

Rio de Janeiro
Abril de 2020

PROPOSTA DE INTRODUÇÃO DO NEXO DA ÁGUA COM ENERGIA E USO DO SOLO DENTRO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO INTEGRADA BRASILEIRO

Rebeca Tricarico Orosco

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO E AMBIENTAL.

Orientadores: Prof., D.Sc.Alexandre Salem Szklo
Prof.,D.Sc André Frossard Lucena

Examinada por: Prof., D.Sc.Alexandre Salem Szklo
Prof.,D.Sc André Frossard Lucena
Prof D.Sc. Daniel Andres Rodriguez
Profª D.Sc. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2020

Orosco, Rebeca Tricarico

Proposta de introdução do nexo da água com energia e uso do solo dentro de um modelo de avaliação integrada brasileiro/ Rebeca Tricarico Orosco. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020

XII, 187 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

André Frossard Pereira de Lucena

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético e Ambiental, 2020

Referências Bibliográficas: p. 89-95.

1. Nexo clima, água, energia e uso do solo 2- Uso de água para bioenergia 3. Tecnologias de mitigação climática. 4. Modelo de Avaliação Integrada (IAM) I. Szklo Alexandre Salem *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROPOSTA DE INTRODUÇÃO DO NEXO DA ÁGUA COM ENERGIA E USO DO SOLO DENTRO DE UM MODELO DE AVALIAÇÃO INTEGRADA BRASILEIRO

Rebeca Tricarico Orosco

Abril/2020

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
André Frossard Pereira de Lucena.

Programa: Planejamento Energético e Ambiental

A compreensão da teia de interações entre clima, geração de energia, recursos hídricos e uso do solo é essencial para nortear a escolha de alternativas tecnológicas e políticas mais eficazes. Enquanto a limitação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) se dá a nível global, a gestão de água é feita localmente. No Brasil, as medidas de mitigação dependem não só do controle do desmatamento, mas também da utilização de fontes renováveis nos cenários de expansão do setor energético. A crescente dependência de fontes de biomassa torna ainda mais importante a avaliação da perspectiva de recursos hídricos, de maneira a evitar o acirramento de situações de estresse hídrico. Modelos de avaliação integrada com ênfase no sistema energético e/ou no uso do solo, como o BLUES (*Brazilian Land-Use Energy System)*, frequentemente não consideram a disponibilidade de recursos hídricos. Este estudo propôs um modelo técnico paramétrico para prever a evolução da demanda de água para dois cenários distintos de governança ambiental no Brasil, associadas à mitigação da emissão de gases de efeito estufa. A avaliação mostra que nem sempre o resultado mais custo efetivo para o setor energético é o melhor em termos de alocação de recursos hídricos e que quanto maior uso de bioenergia, maior a expansão da área irrigada, em especial da cultura de cana-de-açúcar. Não considerar restrições de disponibilidade hídrica pode gerar soluções que agravem situações de escassez e de conflito pelo uso da água.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PROPOSAL FOR INTRODUCING THE WATER-ENERGY-LAND USE SYSTEMS NEXUS INTO A BRAZILIAN INTEGRATED ASSESSMENT MODEL

Rebeca Tricarico Orosco

April/2020

Advisors: Alexandre Salem Szklo
André Frossard Pereira de Lucena

Department: Energy Planning Program

Understanding the complex net of interactions between climate, energy generation, water resources and land use is essential to guide more adequate technological choices and policies. While limiting the greenhouse gas emissions (GHG) is relevant globally, water management is performed at the local level. In Brazil, mitigation measures rely not only on restraining deforestation levels, but also an extensive use of renewable sources for the expansion of the energy sector. Therefore, as biomass sources become more relevant, assessing water implications of climate scenarios should be considered, in order to avoid worsening water stress situations. Integrated assessment models (IAM) that emphasize the evaluation of the energy and/or the land use systems, such as the BLUES (Brazilian Land-Use Energy System), often do not consider the availability of water resources. This study proposes a technical parametric model to predict the increase of regional water demand for two different climate scenarios of environmental governance in Brazil. This assessment shows that the most cost-effective result for the energy and land-use sector is not necessarily the best in terms of water resources allocation. Besides that, the increase of bioenergy use leads to a greater irrigated area requirement, especially for sugarcane. Failing to consider water availability restrictions can aggravate water stress situations and conflict over the use of water.

“Nada é permanente, exceto a mudança”

Heráclito

“Você deve agir como se fosse possível transformar radicalmente o mundo. E você deve fazer isso o tempo todo”

Ângela Davis

“*Em algum lugar de alguma selva, alguém comentou:*
Como os civilizados são esquisitos. Todos têm relógio e ninguém tem tempo”

Eduardo Galeano

Agradecimentos

Escrever esta dissertação foi certamente uma grande jornada, que passou por momentos quase sempre bastante desafiadores, combinando momentos de muita alegria com pitadas de desespero. Contudo, ao finalmente, concluir esse ciclo, no ápice de uma pandemia, percebo que o que levo comigo são grandes aprendizados e novos conhecimentos, generosamente compartilhados pelos grandes mestres que encontrei pelo caminho. Por isso, começo agradecendo aos professores do Programa de Planejamento Energético, e, em especial, aos meus orientadores Alexandre Szklo e André Lucena, que sempre tiveram não só muito para ensinar, mas também sempre me apoiaram e estiveram disponíveis para ouvir as minhas dúvidas sobre quais caminhos trilhar. Agradeço também aos membros da minha banca, por aceitarem examinar meu trabalho, e pelas valiosas contribuições.

Essa jornada certamente se tornou mais leve por ter conhecido tantas pessoas incríveis e ter feito amigos que certamente levarei para vida. Por isso, aproveito para agradecer Lu, Marcella, Mari Zanon, Bela, Carlinha e Otto obrigada por existirem! E, também aos queridos(as) amigos Gerd, Lucas, Adriana, Adriano, Nelson, Tássia, Fê, Pat, Gardênio, Amanda, Lúcia, Matheus pela parceria, e companhia nas horas intermináveis de estudo na salinha, almoços na bandejão, conversas e risadas sem fim. Sou muito grata também por ter a honra de ter feito parte dos pesquisadores do Cenergia, o laboratório com as pessoas mais maravilhosas que eu posso imaginar. Agradeço, portanto, também aos queridos cenergéticos Eve, Bela, Mari Zanon, Dudu, Bruno, Cindy, Mari Império, Tainan, Camilla, Rafa, Fran, Fábio, Fábio A., Camilo, Paula e Pedro por deixarem tudo mais leve com conversas dos mais variados temas, aqueles banhos de sol para tirar o mofo do subsolo e concentrar vitamina D, café quentinho acompanhado de muitos conselhos e bom humor. E claro, um agradecimento mais do que especial à Eveline, minha parceira e mentora que tanto me ajudou e foi fundamental para conseguir chegar até aqui. Outro ser iluminado, que merece um agradecimento em caps lock e negrito é Gerd, por toda paciência, disposição para ouvir e ajudar sempre. E lógico, outro agradecimento especial, ao Pedro que é metade professor, metade energético e por inteiro gênio, obrigada por compartilhar seu conhecimento e sua paciência. Agradeço demais todos os funcionários do PPE, em especial à Sandrinha e ao Paulo, vocês são incríveis!

A lista daqueles que estiveram do meu lado, sem os quais não teria conseguido concluir essa jornada está longe de ter um fim, e provavelmente seria quase tão longa quanto a dissertação em si. Mas não posso deixar de agradecer a algumas mulheres inspiradoras que também encontrei no caminho Laura Albuquerque, Ana Carolina Szklo e Marina Grossi e à toda equipe do CEBDS, em especial, o querido Matheus Zanon, que me incentivava todos os dias incansavelmente.

Além de tantas novas pessoas, tem aquelas que sempre estiveram por perto, me apoiando e possibilitando que apesar das dificuldades que iam surgindo, eu pudesse sempre aproveitar o caminho. Agradeço àqueles que me deram a vida e o apoio incondicional, meus queridos e amados pais. Aos meus irmãos, que amo tanto, por sempre me ouvirem e serem exatamente do jeito que vocês são. Às minhas amigas-irmãs, Carol Magoga, Marie, Cake, Val, Carol Giglio e todos meus amigos que tanto amo. Um agradecimento mais que especial às minhas companheiras de casa, as melhores que existem, Kassandra e Camila(s), que sempre estiveram literalmente na porta ao lado para oferecer uma palavra amiga, um conforto, às vezes na forma de comida, as vezes na forma de abraço. Vocês foram e são muito importantes para mim!

Por fim, mas não menos importante ao Álvaro, que chegou na minha vida no meio do percurso, mas foi fundamental para que terminasse essa caminhada sendo fonte infinita de calma, amor e apoio.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução 1

1.1. Objetivo Geral 8

1.2. Objetivos específicos 8

1.3. Estrutura do Estudo 9

2. Capítulo 2 – Nexo: Clima, Energia, Água e Uso do Solo 10

2.1. Identificação das interações entre Clima, Energia, Água e Uso do Solo 10

2.2. Impactos sobre recursos hídricos no Brasil 17

2.2.1. Conceitos 20

2.2.2. Binômio Quantidade e Qualidade 22

2.2.3. Conflitos pelo uso de água 23

2.2.4. Panorama do Uso de Recursos Hídricos no Brasil 24

2.3. Análise integrada do nexo 34

2.3.1. Cenários Climáticos 34

2.3.1. Orçamento de Carbono 36

2.3.2. Modelos de avaliação integrada 38

2.3.3. Modelo BLUES 39

3. Capítulo 3 - Metodologia para Incorporação do Modelo Paramétrico . 42

3.1. Etapas Metodológicas 42

3.2. Construção do Modelo Paramétrico 45

3.2.1. Quantificação do uso de água para irrigação 51

3.2.2. Quantificação do uso de água para o setor energia 60

3.2.3. Quantificação do uso de água para o setor de abastecimento humano 87

3.2.4. Quantificação do uso de água para Abastecimento Animal 91

3.2.1. Quantificação do uso de água para o setor industrial 93

3.3. Apresentação do Estudo de Caso 96

4. Capítulo 4 – Resultados e Discussão 104

4.1. Coeficientes Técnicos 104

4.1.1. Irrigação 104

4.1.2. Energia 107
4.1.3. Abastecimento Humano 111
4.1.4. Abastecimento Animal ..... **Erro! Indicador não definido.**
4.1.5. Indústria 112
4.2. Validação do Modelo técnico paramétrico 114
4.3. Análise do Estudo de Caso 117
4.3.1. Água para Irrigação 117
4.3.1. Água para Energia 121
4.3.2. Água para Indústria 125
4.3.3. Água para Abastecimento Humano e Animal 129
4.3.4. Análise Integrada do Nexo 135
4.3.5. Balanço Quantitativo 147
5. Capítulo 5 - Conclusão 152
5.1. Conclusões 152
5.2. Limitações do trabalho 154
5.3. Sugestões para Próximos Trabalhos 155
Anexo I 158
Referências Bibliográficas 161

Lista de Figuras

Figura 1:Média das emissões totais do setor de uso do solo por região (Mt CO2eq) entre 2010 -2015 3
Figura 2: Perdas e danos na agricultura como parcela do total de perdas e danos de todos os setores por tipo de risco climático 4
Figura 3: Interações do Nexo Clima, Água, Energia e Uso do Solo Fonte: Elaboração própria 11
Figura 4: Emissões Globais diretas e indiretas por setor 12
Figura 5: Uso de água global para produção de energia em cenário de novas políticas 15
Figura 6: Alterações Climáticas previstas para a América Latina Fonte: IPCC (2014) 16
Figura 7: Matriz Energética Brasileira 18
Figura 8: Evolução das emissões totais no Brasil entre 1990 -2018 19
Figura 9: Retirada de água para os usuários consuntivos em 2017 25
Figura 10: Balanço Hídrico por Região Hidrográfica 27
Figura 11: Uso de água para os diferentes setores por região hidrográfica 28
Figura 12: Trajetórias sócio econômicas (SSPs) Fonte: RIAHI, *et al.*, (2016) 35
Figura 13: Mudanças no uso do solo para cenários de mudanças climáticas 36
Figura 14: Orçamento de Carbono na literatura 37
Figura 15: Trajetórias de emissões segundo IPCC, 2018 38
Figura 16: Categorias de uso do solo no modelo BLUES (KOBERLE, 2018) 41
Figura 17: Etapas para Construção, Validação e Teste do Modelo Técnico Paramétrico 43
Figura 18:Fluxograma das interações entre o Modelo BLUES e do Modelo Paramétrico 44
Figura 19: Expansão da área irrigada segundo ANA (2017c) 55
Figura 20: Metodologia para espacialização das demandas para irrigação no modelo paramétrico 57
Figura 21: Fluxograma do Balanço Hídrico proposto para Cálculo do Coeficiente Hídrico 65
Figura 22: Fluxograma de desagregação de tecnologias para Bioetanol 69
Figura 23: Fluxograma das etapas do processo de produção de Etanol 1ª Geração 70
Figura 24:Balanço Hídrico de uma usina típica brasileira 71
Figura 25: Rotas Tecnológicas para produção de bioquerosene 77
Figura 26: Fluxograma de produção de Diesel Verde 77
Figura 27:Fluxograma de Processo de obtenção de ATJ 78
Figura 28: Fluxograma simplificado das etapas do processo de bioquerosene via FT Fonte: Adaptado de KLEIN *et al.* (2018) 79
Figura 29: Metodologia para espacialização das demandas do setor energético 83
Figura 30: Emissões acumuladas para os cenários SEG, IEG 98
Figura 31: Emissões totais para o setor de energia no período 2010- 2050 99
Figura 32: Energia primária para os cenários estudados para 2020, 2030, 2040 e 2050 100
Figura 33: Geração de energia elétrica para os cenários SEG e IEG 101

Figura 34: Biocombustíveis para os cenários SEG e IEG de 2010 a 2050 101
Figura 35: Uso de bioenergia com CCS para os cenários SEG e IEG 102
Figura 36: Análise dos coeficientes técnicos para irrigação por estado em m³/ha.ano 107
Figura 37: Comparação de coeficientes técnicos para diferentes tecnologias do setor de energia 110
Figura 38: Evolução da retirada de água para irrigação 2010 - 2050 118
Figura 39: Aumento da área irrigada 2010 - 2050 118
Figura 40: Água para irrigação por cultura e por cenário 2010 – 2050 119
Figura 41: Retirada de água para o setor de energia por cenário 2010 -2050 121
Figura 42: Consumo de água para o setor de energia por cenário 2010-2050 122
Figura 43: Retirada de água por opção de mitigação no setor energético Fonte: Elaboração própria 123
Figura 44: Consumo de água por opção de mitigação para o setor energético 124
Figura 45: Retirada de água para indústria por categoria 2010 - 2050 126
Figura 46: Consumo de água na Indústria por categoria 2010 -2050 126
Figura 47:Distribuição espacial da demanda de água para indústria em 2010 128
Figura 48: Retirada de água para indústria por estado em 2050 129
Figura 49: Retirada de Água para Abastecimento Urbano e Rural 2010 – 2050 Fonte: Elaboração própria 130
Figura 50: Comparação entre retirada e consumo de água para abastecimento humano (2050) ... 130
Figura 51:Abastecimento Humano por Estado Brasileiro em 2010 132
Figura 52: Abastecimento Humano por Estado Brasileiro em 2050 Fonte: Elaboração própria ... 132
Figura 53:Retirada de água para abastecimento animal 2010 -2050 133
Figura 54: AbastecimentoAnimal para cenário IEG em 2030 134
Figura 55:Abastecimento animal para cenário SEG em 2030 134
Figura 56:: Evolução da retirada de água por setor 2010-2050 para o cenário SEG 135
Figura 57: Evolução da retirada de água por setor 2010 -2050 para o cenário IEG 136
Figura 58: Evolução do consumo de água por setor entre 2010 - 2050 para o cenário SEG 137
Figura 59: Evolução do consumo de água por setor entre 2010 - 2050 para o cenário IEG 138
Figura 60: Análise do uso de água por setor no cenário SEG 140
Figura 61: Análilse do uso de água por setor para o cenário IEG 141
Figura 62: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para cenário SEG em 2010 149
Figura 63: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para o cenário SEG em 2030 149
Figura 64: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para cenário SEG *em 2050* 150
Figura 65: Criticidade Hídrica para o cenário IEG em 2030 150
Figura 66: Estresse Hídrico para o cenário IEG em 2050 151

Lista de Tabelas

Tabela 1: Balanço Hídrico Quantitativo 22
Tabela 2: Resumo das características gerais das regiões hidrográficas brasileiras 26
Tabela 3:Setores estudados e as respectivas finalidades do uso de água 42
Tabela 4: Dados de entrada fornecidos pelo Modelo BLUES 46
Tabela 5: Distribuição da área superficial das Regiões Hidrográficas por Estado 49
Tabela 6: Principais fontes de Informações para construção do modelo paramétrico 50
Tabela 7: Equivalência da Lista de Culturas estudadas e categorias do modelo BLUES 51
Tabela 8: Percentual de Irrigação por estado 54
Tabela 9: Média da produtividade histórica (kt/ha área colhida) para culturas selecionadas por estado entre 1980 e 2017) 58
Tabela 10: Lista das Tecnologias utilizadas para o setor de energia 62
Tabela 11:Distribuição de sistema de resfriamento no período 2010 - 2050 64
Tabela 12: Perdas de água associadas 73
Tabela 13:Coeficientes Hídricos para produção de etanol anidro 73
Tabela 14:Balanço Hídrico Planta de Produção de Etanol 2ª Geração 75
Tabela 15:Coeficientes Hídricos para produção de Etanol de 2ª Geração 75
Tabela 16: Coeficiente Hídrico para produção de bioquerosene por hidroprocessamento (HEFA) 78
Tabela 17:Coeficiente Hídrico para rota ATJ para produção de bioquerosene 79
Tabela 18:Coeficiente Hídrico para produção Bioquerosene via Fischer-Tropsch 79
Tabela 19:Coeficientes hídricos para a extração de carvão mineral 81
Tabela 20:Coeficientes hídricos para exploração do shale gas 82
Tabela 21: Coeficientes hídricos para refinaria de produtos de petróleo 82
Tabela 22: Espacialização do uso de água para o refino 83
Tabela 23: Resumo dos critérios e fontes de dados para espacialização da demanda de água do setor de energia 84
Tabela 24: Taxa de Crescimento da Indústria entre 2010 e 2050 86
Tabela 25 Projeção para crescimento da população e PIB 88
Tabela 26: Glossário dos indicadores disponibilizados pelo SNIS para estimativa de coeficientes de uso de água 89
Tabela 27: Coeficientes de uso de água para abastecimento rural por estados 91
Tabela 28: Coeficientes de uso de água para abastecimento animal 92
Tabela 29: Relação entre rebanho efetivo e produção pecuária 92
Tabela 30: Classificação do setor industrial no modelo BLUES 94
Tabela 31: Equivalência entre as classificações de usuários consuntivos entre este estudo e ANA 94
Tabela 32: Orçamento de Carbono baseado em ROCHEDO *et al*. (2018) 97
Tabela 33: Investimento e Custo de Operação e Manutenção (O&M) para os cenários SEG e IEG 102
Tabela 34: Coeficiente técnico para retirada de água para irrigação por cultura (m³/ha.ano) 105

Tabela 35: Resumo dos Coeficientes hídricos para o Setor Energético 107
Tabela 36: Coeficientes técnicos para Abastecimento Urbano 111
Tabela 37: Coeficientes técnicos para o abastecimento animal 112
Tabela 38: Coeficientes técnicos para o uso de água na indústria em m³/MMreais 112
Tabela 39: Validação dos dados de 2010 com ANA (2009) 114
Tabela 40: Comparação dos valores para o ano de 2015 com ANA (2017a) 115
Tabela 41: Comparação da área irrigada efetiva 116
Tabela 42: Vazões de retirada (m³/s) para as regiões hidrográficas para os cenários estudados ... 138

Capítulo 1 - Introdução

Os impactos gerados pelas atividades humanas sobre o ecossistema terrestre afetam diretamente a disponibilidade e a permanência dos recursos naturais não apenas no curto prazo, mas em especial para as gerações futuras. As mudanças climáticas representaram um alerta em nível global sobre a necessidade de buscar soluções alternativas e caminhos de desenvolvimento mais sustentáveis. Os efeitos cumulativos das mudanças no clima põem em risco todas as dimensões da segurança alimentar (FAO, 2018), dada a interdependência entre alterações climáticas, disponibilidade de alimento e ciclo hidrológico, bem como sua relação com a geração e armazenamento de energia final. Portanto, uma abordagem focada unicamente na redução emissões de gases do efeito estufa não é suficiente para construir opções verdadeiramente resilientes. É necessária uma visão holística para compreender os efeitos sinérgicos e soluções de compromisso (*tradeoffs*) entre diferentes setores afetados.

Clima, energia, água e sistemas de uso de solo (CLEWS - *Climate, Energy, Water and Land-use Systems*) estão intimamente conectados e abrangem simultaneamente diversas metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), propostos na agenda 2030 (UNEP, 2016). As conexões e sobreposições entre os objetivos no nexo CLEW contemplam pelo menos oito dos 17 objetivos: Fome zero e agricultura sustentável (ODS 2), Ação contra a mudança global do clima, (ODS 13), Vida na água (ODS 14), Energia limpa e acessível (ODS 7), Água potável e Saneamento (ODS 6), Trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8), Indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9), Vida Terrestre (ODS 15). No entanto, decisões relacionadas a cada um dos setores, assim como a formulação e aplicação de políticas, ocorrem em sua maioria em instituições isoladas, baseadas em avaliações relativamente desconectadas dos sistemas de recursos individuais (VANHAM, 2016, WELSCH *et al.*, 2014). Um planejamento mais robusto depende de uma visão integrada, de forma que se compreendam as interações e impactos entre diferentes setores. Esta tarefa desafiadora vem sendo explorada no meio acadêmico por meio de abordagens do tipo nexo (BAZILIAN *et al.*, 2011, CAI *et al.*, 2018, ROIDT e

STRASSER, 2015, SCHLOSSER *et al.*, 2014, SZKLO *et al.*, 2017, VAN DER ZWAANLER, *et al.*, 2014).

Diante das projeções de crescimento populacional (WORLD BANK, 2018), espera-se que aumentem também as pressões sobre os recursos naturais, especialmente sobre o uso do solo, devido ao aumento da demanda por alimento e à necessidade de expansão do setor energético. Cresce ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos, uma vez que as atividades agropecuárias são as maiores consumidoras de água (ANGELKORTE, 2019) e o setor energético, por sua vez, é responsável pela retirada global de água de em torno de 15%, estimados em 583 bilhões de metros cúbicos em 2010 (IEA, 2016).

Ademais, projeções apontam para mudanças na disponibilidade hídrica em diversas zonas tropicais e subtropicais no futuro (IPCC, 2014, MARGULIS *et al.*, 2010). Schlosser *et al.* (2014) mostram que a combinação dos efeitos do crescimento socioeconômico e a incerteza quanto às mudanças climáticas apontam para um aumento de 1,0 a 1,3 bilhões de pessoas (na população projetada para 2050) vivendo em regiões em condições de superexploração de água, onde o potencial total de demanda de água ultrapassará a oferta. A ONU, por sua vez, estimou que, em 2050, 40% da população mundial viverá em bacias com alto nível de estresse (UNEP, 2016). Portanto, as variações e extremos climáticos afetam tanto as dinâmicas dos setores de uso do solo, energia, variando a demanda por água, mas também geram potenciais variações na oferta hídrica, tornando a avaliação dos impactos sobre os recursos hídricos imprescindível para a identificação de potenciais situações de escassez hídrica a fim de nortear políticas públicas.

Os impactos previstos das mudanças climáticas incluem queda da produção agrícola em muitas áreas (particularmente nos países em desenvolvimento), diminuição significativa da disponibilidade de água em diversos territórios, danos extensos aos recifes de corais e número crescente de espécies que enfrentarão extinção, intensidade crescente de tempestades, incêndios florestais, secas, inundações e ondas de calor (MALEK *et al.*, 2017, ROJAS-DOWNING *et al.*, 2017, TEEB, 2018).

Além disso, a produção agropecuária e sistemas alimentares são relevantes emissores de gases de efeito estufa (GEE), e ao mesmo tempo as principais vítimas dos efeitos das mudanças climáticas (FAO, 2018, TEEB, 2018). Na Figura 1 pode ser vista a participação dos países em termos de emissões de GEE no setor de mudanças do uso do solo, em cujos dados o Brasil destaca-se como o maior emissor.

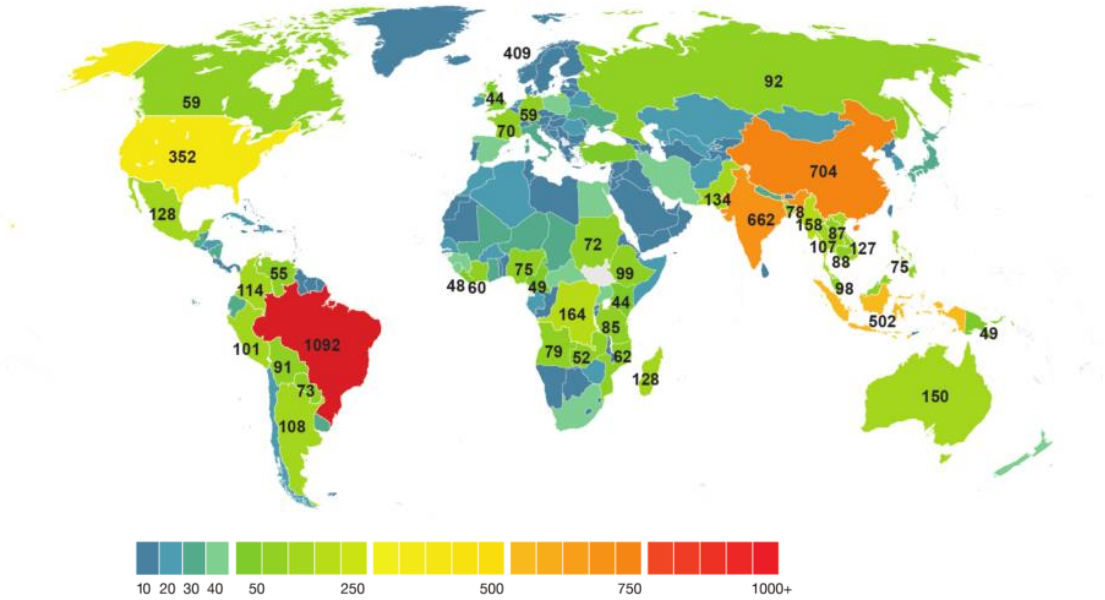


Figura 1:Média das emissões totais do setor de uso do solo por região (Mt CO2eq) entre 2010 -2015

Fonte: Roe *et al.*(2017)

De maneira geral, o aumento da escassez hídrica limita mais a produção agrícola do que disponibilidade de terra e juntamente com as mudanças climáticas, deve restringir gravemente a capacidade de expandir ainda mais a produção de alimentos (FOLLADOR, 2016, TEEB, 2018). As secas são consideradas como o principal risco para a transferência de água entre bacias para as mudanças climáticas, o que afetará significativamente a disponibilidade de água. Temperaturas mais altas (levando ao aumento da evaporação) e menos precipitação (levando a menos provisões de água) podem resultar em secas mais frequentes e severas (FAO, 2018, ZHANG et al., 2018).

Os riscos de seca e déficits de precipitação são ainda maiores para um aquecimento global de 2°C do que comparados com 1,5°C em algumas regiões (IPCC, 2018). A Figura 2 mostra que dentre todos os riscos climáticos o que mais afeta proporcionalmente a agricultura em relação aos outros setores é a seca, novamente confirmando a extrema importância de realizar análises do ponto de vista dos recursos hídricos (FAO, 2018) e das alterações climáticas (ASSAD *et al.*, 2013, SILVA *et al.*, 2018, ZULLO JR *et al.*, 2006).

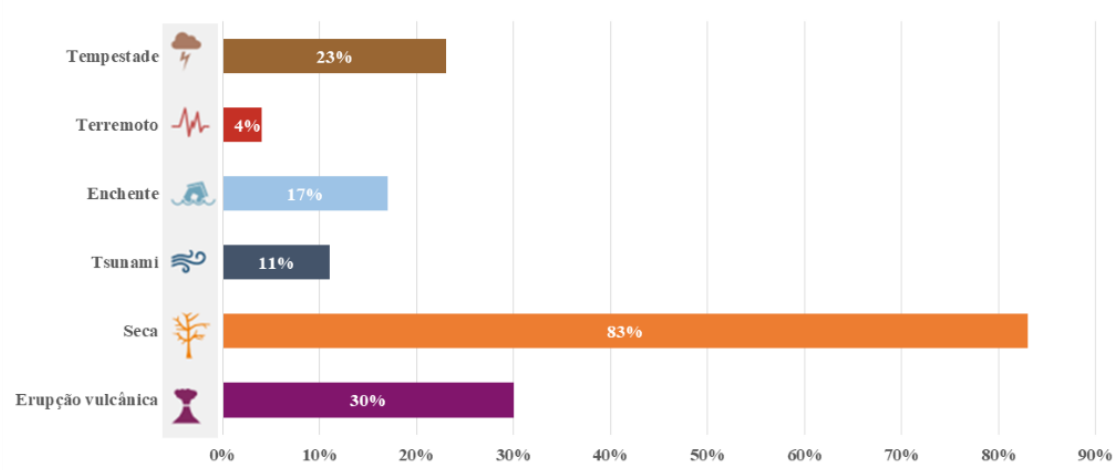


Figura 2: Perdas e danos na agricultura como parcela do total de perdas e danos de todos os setores por tipo de risco climático

Fonte: FAO (2018)

Nos últimos dois anos, o Fórum Econômico Mundial[1] apontou os eventos climáticos extremos e crises hídricas entre os 10 maiores riscos globais para a humanidade com a maior probabilidade de ocorrência e maior impacto respectivamente. A nutrição é altamente suscetível a mudanças no clima e, consequentemente, carrega um fardo pesado, como visto na qualidade de nutrientes e diversidade alimentar de alimentos produzidos e consumidos, os impactos na água e saneamento e os efeitos nos padrões de riscos à saúde e doenças (FAO, 2018).

A oferta energética também precisa ser transformada para que as reduções de emissões possam ser atingidas (ROGELJ *et al.*, 2018). Sistemas energéticos baseados em fontes renováveis são tipicamente mais vulneráveis às mudanças climáticas do que aqueles baseados em combustíveis fósseis (SCHAEFFER *et al.*, 2012). Dessa forma a escolha das estratégias de mitigação terão grande influência não só nas emissões de GEE advindas do setor energético, mas também no formato do sistema energético que estará exposto a futuros impactos climáticos (LUCENA *et al.*, 2018).

[1] Relatório anual sobre riscos globais: https://www.weforum.org/reports/the-global-risks-report-2019 e 2020

As alternativas de mitigação em uso atualmente e os compromissos assumidos internacionalmente no âmbito do Acordo de Paris via NDCs[2] não são suficientes para limitar o aquecimento global do planeta a um aumento de 1.5°C a 2.0°C (ROCHEDO, 2016, TEEB, 2018, UNEP, 2018). Isso inclui o aumento de bioenergia e tecnologias de energia renovável, a substituição da utilização de combustíveis fósseis e a implantação de tecnologias de remoção de CO_2 (CDR – *Carbon Dioxide Removal*), como Bioenergia com Captura e Captura de Carbono (BECCS – *Bioenergy with Carbon Capture and Sequestration*) ou de reflorestamento em grande escala (FAJARDY*et al.*, 2019, MINX *et al.*, 2017, ROGELJ *et al.*, 2018).

Na maioria dos cenários de mitigação é projetado um crescimento do uso de bioenergia com ou sem Captura e Armazenamento de Carbono (*sigla em inglês* – CCS), com significativos impactos potenciais para o uso do solo e agricultura e sobre os recursos hídricos (ARAUJO, 2020; MANDER *et al.*, 2017; MURATORI *et al.*, 2016 *apud* KOBERLE, 2018). A utilização de bioenergia e, em especial, a bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS)[3] consiste em um ponto de atenção, uma vez que o uso do solo para fins energéticos compete com o uso para fins alimentares, o que pode levar preocupações para segurança alimentar e impactos sobre a biodiversidade (ROGELJ *et al.*, 2018).

Os níveis de BECCS descritos em cenários consistentes com as aspirações do Acordo de Paris representam um imenso desafio sob várias perspectivas, carecendo de investimentos maciços em infraestrutura e estruturas regulatórias (GOUGH *et al.*, 2018, KÖBERLE, 2019). Além disso, os recursos necessários para alcançar a produção desejada podem incluir o uso de fertilizantes, que por sua vez levam ao aumento de emissões de GEE e do uso de água. Para uma produção BECCS de 170 EJ por ano em conformidade com 2ºC em 2100, a pegada hídrica seria de 59,5 $km^3/GtCO_2$ até 2100, o que corresponde a 1,5% das retiradas anuais de água doce, segundo Minx *et al.*(2018).

Stenzel *et al.* (2019) calcularam a quantidade de água que seria necessária para suprir a demanda de emissões negativas por meio de BECCS como tecnologia potencial para atingir um cenário de 1,5°C. Os resultados apontam uma faixa entre 300 e 400 km^3

[2] Sigla do inglês, *Nationally determinated Contribution*, que são as contribuições nacionalmente determinadas para o Acordo de Paris, submetidas pelas Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC).

[3] BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage

por ano de retirada global de água para irrigação para cultivos destinados a bioenergia, variando de acordo com a eficiência de conversão do processo de captura e armazenamento de carbono. Os autores também concluíram que, ao levar em consideração os requisitos mínimos de vazão ambiental[4], os potenciais de emissões negativas reduzem significativamente, mas podem ser parcialmente compensados por melhorias na gestão de água local.

Vuuren *et al.* (2015) mostraram que, se não forem adotadas novas políticas, a produção de alimentos e geração de energia poderiam aumentar em 60% e levar a um consumo de água de cerca de 20% maior no período de 2015-2050, levando a maior degradação e pressão sobre os recursos ambientais

Portanto, segurança energética e mudanças climáticas têm um peso cada vez mais crítico afetando políticas, regulações e investimentos no setor energético (BAZILIAN *et al.*, 2011). Como instrumento de planejamento, modelos integrados usualmente são utilizados com foco no setor energético, uso do solo e mudanças climáticas, de modo a fornecer uma compreensão sob quais premissas tecnológicas e econômicas as metas climáticas poderiam ou não ser alcançadas (ROGELJ *et al.*, 2018).

Para manter o aquecimento da temperatura média global abaixo de 2,0°C, portanto, é importante limitar a demanda futura de energia além de combinar uma mudança nos padrões de consumo aliado com uma intensificação sustentável da agricultura e tecnologias de remoção de CO_2 (KRIEGLER *et al.*, 2018, ROGELJ *et al.*, 2018, ROSENZWEIG *et al.*, 2020). O setor energético, e em especial, o setor agrícola, em especial, dependem fortemente da disponibilidade hídrica. Contudo, a priorização das opções de mitigação entre os múltiplos setores carrega uma forte lógica financista e frequentemente os custos indiretos e os custos sociais relacionados os impactos hídricos não são levados em consideração (WALLIS *et al.*, 2014).

Os resultados obtidos por modelos de avaliação integrada têm focado nas sobreposições das soluções de mitigação para uso do solo e para o setor energético (FRANK *et al.*, 2019, FUJIMORI *et al.*, 2019, ROGELJ, *et al.*, 2018; ROCHEDO *et al*, 2018), com poucos estudos ainda levando em consideração os impactos sobre os recursos

[4] Vazão ambiental é definido como "Regime de vazões a ser mantido no rio, nas áreas úmidas e nas áreas costeiras de modo a preservar os ecossistemas e seus benefícios onde existir competição pelos usos da água e onde as vazões são; a quantidade de água que deve ser mantida no rio, ou que é lançada dentro dele, para atender o específico da gestão de tal ecossistema" (GONDIM, 2006)

hídricos.[5] Torna-se, portanto, fundamental a inclusão desta variável de maneira "*bottom up"* nos modelos integrados globais, de forma que as análises sobre políticas climáticas, energéticas e ambientais estejam em consonância com os limites hidrológicos locais.

No caso do Brasil, em especial, há uma forte relação das interações entre o nexo água-clima- energia e uso do solo. Destacado como maior emissor da categoria de uso do solo (ROE *et al.*, 2017) as emissões provenientes da mudança de uso do solo como decorrência de desmatamento são as responsáveis pela maior parcela das emissões nacionais. O setor energético, por sua vez, baseia-se também fortemente em uma expansão do uso de biocombustíveis e biomassa para geração de energia elétrica, além da já relevante energia hidrelétrica.

Rochedo *et al.* (2018) estudaram as consequências de diferentes cenários de governança ambiental, visando discutir o estresse causado entre a relação do controle de desmatamento e o custo de redução de emissões de GEE - e as consequentes interações no setor energético. Esses cenários, contudo, não consideram as repercussões de uma redução da cobertura de área florestal sob a ótica dos recursos hídricos. Marengo e Souza Jr (2018) apontaram que o aumento do desmatamento na Amazônia levaria a reduções significativas nos regimes de chuva, impactando de maneira significativa a hidrologia regional, bem como os países no entorno da região Amazônica num curto prazo, ressaltando a relevância de estudar os impactos sobre os recursos hídricos nesse contexto.

Estudos anteriores focaram mais especificamente no impacto do uso de água pelo setor elétrico, focando nos impactos das utilizações de diferentes tipos de tecnologia de resfriamento (FRICKO *et al.*, 2016a, VÁSQUEZ-ARROYO, 2018). Vásquez-Arroyo (2018) elaborou uma metodologia para incorporação de um módulo de água no modelo de avaliação integrada, BLUES, com enfoque no setor elétrico, não incluindo outras cadeias de conversão de energia e os usos não energéticos. Angelkorte (2019) propôs um aprimoramento da modelagem do setor agropecuário brasileiro, no BLUES, através de novas tecnologias para cultivo agrícola e irrigação, possibilitando a contabilização de água também para o setor de uso do solo.

Brasil(2018) constatou que os principais estudos de projeções das demandas hídricas consuntivas no Brasil (ANA, 2017a; ANA 2017b; ANA, 2015; ONS, 2003;

[5] Há exceções como a tese de VÁSQUEZ-ARROYO (2018), que propõe metodologia para a incorporação de restrições de disponibilidade hídrica em modelos de otimização da expansão energética.

2005) consideraram apenas fatores internos[6] na sua expansão e não envolveram cenários de mudanças climáticas. Dessa forma, o presente estudo pretende avaliar em que medida as alternativas tecnológicas para mitigação de emissão de GEE impactam na demanda por água individualmente e de maneira global por cenário climático, e identificar possíveis situações de estresse hídrico em nível regional no Brasil, com foco no papel dos biocombustíveis no nexo clima, água, uso do solo e energia.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é desenvolver um modelo técnico paramétrico capaz de obter projeções de uso de água desagregadas por estado e por setor, a partir dos resultados de um modelo de avaliação integrada, cujo foco é energia e uso do solo. O modelo paramétrico proposto é validado com um estudo de caso baseado em um resultado de um modelo de avaliação integrada, já publicado para o Brasil (ROCHEDO *et al*., 2018).

1.2. Objetivos específicos

- Compreender os tr*ade-offs* e sinergias entre clima, água, uso do solo e energia;
- Identificar as etapas dos processos em que há uso de água para as tecnologias de mitigação de emissão de GEE, diferenciando o uso entre consumo e retirada;
- Propor e calcular coeficientes técnicos para obter estimativa do uso de água para um conjunto de tecnologias de mitigação relacionadas a bioenergia
- Desenvolver e testar o modelo técnico paramétrico com os valores de referência nacional;
- Fazer projeções para o uso de água por cada setor estudado;
- Obter resultados a partir de um estudo de caso utilizando cenários já publicados a partir do modelo integrado BLUES que retratam situação de estresse entre energia e uso do solo, sem considerar aspectos relacionados aos recursos hídricos;
- Analisar as alternativas de mitigação climática sob a ótica da disponibilidade de recursos hídricos.

[6] Fatores internos como comportamento demográfico, crescimento econômico e mudanças no estilo de vida

1.3. Estrutura do Estudo

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro capítulo faz uma introdução, situando a problemática em torno do tema, bem como a contribuição deste estudo na fronteira da literatura. Além disso, lista os objetivos gerais e específicos que devem ser cumpridos e alcançados ao longo dos próximos capítulos.

No segundo capítulo são abordados os aspectos gerais das interações entre os setores estudados: clima, água, energia e uso do solo, evidenciando qual recorte específico este estudo focará (Seção 2.1). Em seguida, são apresentados conceitos e tópicos relevantes para as análises relativas ao estudo do gerenciamento de recursos hídricos (Seção 2.2). A contextualização do tema no Brasil foca nos recursos hídricos e o panorama e a situação atual das principais bacias hidrográficas e seus usos (Seção 2.3). Além disso, são apresentados os modelos de avaliação integrada como ferramenta para análise do nexo, e um detalhamento do modelo *Brazilian Land-use and Energy System* (BLUES) (Seção 2.4). No terceiro capítulo a metodologia para construção do modelo técnico paramétrico é descrita detalhadamente, bem como os critérios adotados para a determinação dos requerimentos de água para os setores estudados (Seção 3.1). Em seguida, também é apresentado brevemente o estudo de caso que será utilizado para aplicação do modelo paramétrico e análise dos resultados (Seção 3.3). No quarto capítulo são apresentados os coeficientes propostos para o cálculo no modelo paramétrico e o modelo desenvolvido é validado com base em um estudo de caso para o Brasil. São apresentados e discutidos os resultados para cada um dos setores estudados e é feita uma análise compreensiva do nexo, com o foco na avaliação dos impactos hídricos para o caso estudado (Seção 4.3). Por fim, no capítulo 5 são retomadas as principais conclusões e contribuições do estudo, bem como as limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2. Capítulo 2 – Nexo: Clima, Energia, Água e Uso do Solo

Neste capítulo serão apresentadas as interações do nexo clima, energia, água e uso do solo, evidenciando qual recorte específico este estudo focará. A avaliação integrada permite identificar os impactos sobre uma área enquanto considera as sinergias e *trade-offs* em outras dimensões. Dessa maneira será avaliado, em que medida uma expansão do setor energético em um cenário de restrições climáticas pode afetar os recursos hídricos e quais as ferramentas de modelagem disponíveis e que serão utilizadas nessa análise, bem como suas limitações.

2.1. Identificação das interações entre Clima, Energia, Água e Uso do Solo

O estudo do nexo se dá a partir da necessidade por um pensamento sistêmico, que considere as interações entre os ciclos de produção de energia, alimentos e água e as mudanças do clima e a proporção em que ações tomadas em uma determinada esfera possam impactar positiva ou negativamente os outros setores (GULATI *et al.*, 2013, ROIDT e STRASSER, 2015).

Esse tipo de abordagem, portanto, é essencial para uma gestão integrada eficiente e central nas discussões relativas ao desenvolvimento e monitoramento dos objetivos de desenvolvimento sustentável (BAZILIAN *et al.*, 2011, DAMERAU *et al.*, 2016, BIGGS *et al.*, 2015). Quando bem engendrada é uma ferramenta poderosa para dar suporte aos formuladores de política sobre suas opções para a tomada de decisão e desenvolvimento de políticas de gestão eficiente de recursos de forma a aproveitar oportunidades de sinergias e evitar situações potenciais de tensão. (ROGELJ *et al.*, 2018, BAZILIAN *et al.*, 2011, SIMONOVIĆ, 2012)

Na literatura, os estudos estão mais frequentemente voltados para o nexo água-energia-alimento (*WEF – water food energy* nexus) (BELLEZONI *et al.*, 2018, BIGGS *et al.*, 2015, GARCIA e YOU, 2016, ROIDT e STRASSER, 2015, VANHAM, 2016, VUUREN*et al.*, 2015; CAI *et.al*, 2017). E segundo Garcia e You (2016) tipicamente apenas duas das três dimensões do nexo WEF tem sido alvo de estudos diretos (água-energia, água-alimento ou energia-alimento).

Neste trabalho, o pilar “alimento” é explorado sob a ótica de sistemas de uso do solo, que incluem todas as transformações possíveis para diferentes finalidades, sendo uma delas a produção de alimentos. Ao analisar o uso do solo, tão importante quanto a finalidade do seu uso é a sua configuração inicial. Quando, por exemplo, uma área originalmente de floresta é convertida em área para produção de alimentos ou pastagem há diversas implicações tanto para o solo, quanto para a água e emissões. Portanto, pretende-se explorar as interações entre as mudanças de uso do solo, a produção de energia e os impactos sobre os recursos hídricos, focando na relação de cada um desses com o clima, do ponto de vista de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

O clima impacta diretamente todas as dimensões e a forma de interação entre cada um dos elementos do nexo, que estão conectados e, portanto, são afetados (HOWELLS *et al.*, 2013, WELSCH *et al.*, 2014). A Figura 3 ilustra o nexo CLEWS que engloba, portanto, clima, sistemas de uso do solo, energia e água. A seguir, serão exploradas as principais interações relevantes neste estudo, ainda que não seja possível esgotar todas as interrelações existentes.

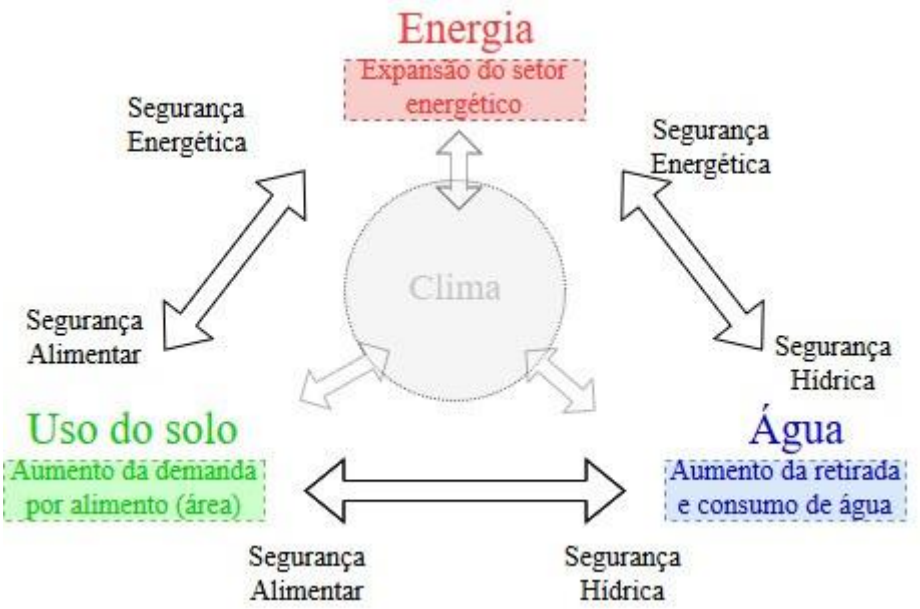


Figura 3: Interações do Nexo Clima, Água, Energia e Uso do Solo

Fonte: Elaboração própria

A terra é um insumo crítico para o setor de agricultura, floresta e outros usos do solo que fornece múltiplos serviços ecossistêmicos de provisão (alimentos, fibras, água,

energia, biodiversidade), regulação (regulação climática, de riscos, controle de poluição, etc), culturais (recreação, turismo etc) e de suporte (produção primária, decomposição, interações ecológicas) (SMITH, BUSTAMANTE, 2014). Também participa de maneira relevante na manutenção do equilíbrio do ciclo de carbono atuando de maneira semelhante a um estoque de carbono. Através do processo de fotossíntese, as plantas capturam CO_2 da atmosfera, que fica armazenado no solo ou é convertido em biomassa durante seu crescimento.

As mudanças de uso do solo que envolvem a transformação da sua cobertura original, como, por exemplo, a degradação de áreas de florestas, e agricultura são responsáveis por 24% das emissões globais diretas (IPCC, 2014) como pode ser visto na Figura 4. Portanto, o uso do solo atua tanto como um reservatório quanto como um emissor de GEE (IPCC, 2019a). Anualmente as emissões atribuídas ao uso do solo são responsáveis globalmente pela emissão de 5,2 $GtCO_{2eq}$ por ano, enquanto sequestra 11,2 $GtCO_{2\ eq,}$ o que corresponde a um benefício líquido de 6 Gt $CO_{2\ eq}$, cerca de 3 vezes o total de emissões anuais do Brasil (WRI, 2019;IPCC, 2019).

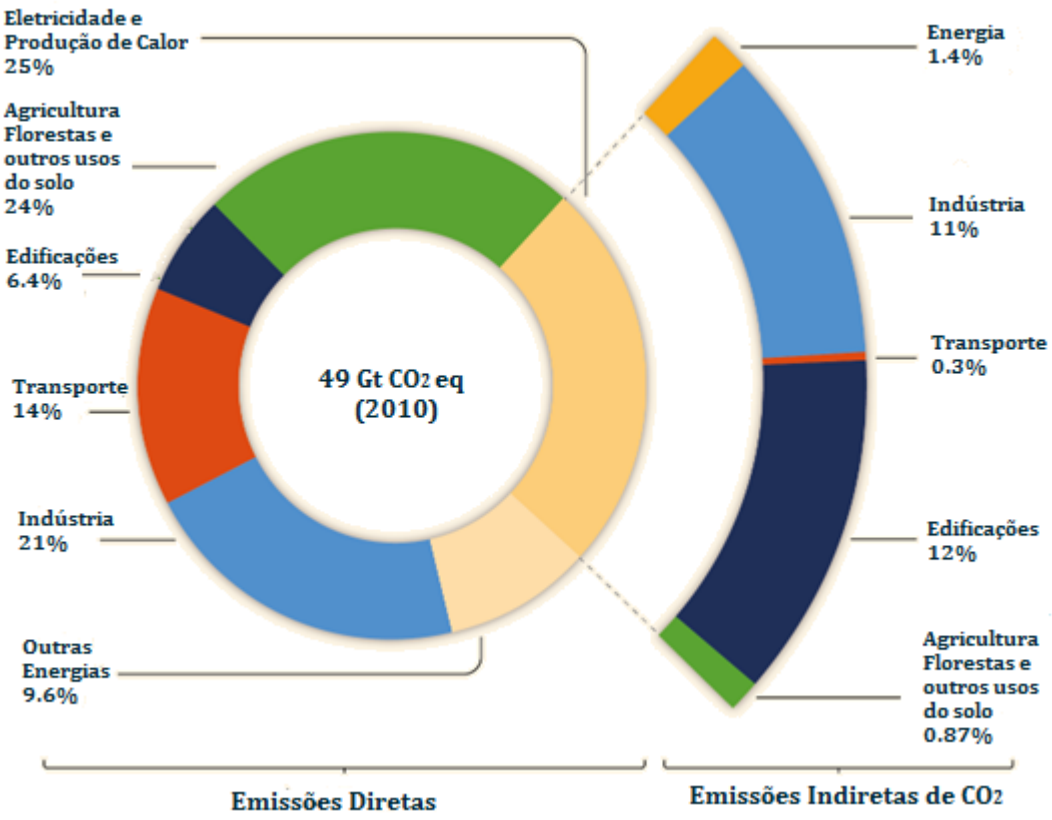


Figura 4: Emissões Globais diretas e indiretas por setor

Fonte: adaptado de IPCC, 2014 (AR5)

Os principais usos do solo no mundo atualmente estão destinados para agricultura, para produção de alimento e culturas energéticas e para pecuária, para criação de animais para fins alimentares. O setor agropecuário destaca-se tanto pela sua magnitude quanto pela intensidade. A porção de terra para pastoreio de ruminantes cobre mais de 25% da superfície global e responde por 70% das áreas voltadas para fins agrícolas (STEHFEST *et al.*, 2009). Nas últimas décadas, na América Latina, em países como o Brasil, a maior parte da expansão agropecuária se deu principalmente através do aumento das atividades agropecuárias, a partir da substituição de vegetação nativa para terras aráveis (FAO, 2006).

Segundo o Relatório da FAO (2016), mais de 80% do desmatamento no Brasil foi associado a conversão da terra para pastagem. O desmatamento de áreas florestais para conversão da terra para fins agropecuários representa mais um forte impacto ambiental desta atividade. Estima-se que as emissões por mudança de uso do solo no Brasil estejam no patamar de 3,0 a 7,7 kg CO_{2eq} por quilo de grão de soja produzido (HEDENUS *et al.*, 2014). FAO (2006) estimou que essa expansão ocasionou uma taxa de desmatamento de 0,5 milhões de ha por ano associada ao setor pecuário na América Latina. A pecuária extensiva, por sua vez, é frequentemente praticada em ambientes afastados, nos quais desmatamento e degradação de solo refletem a fraqueza nas instituições e políticas de fiscalização (GERBER *et al*, 2013).

A indução do desmatamento causada pelas atividades agropecuárias além de ter impactos diretos sobre as mudanças climáticas, pode incorrer em altos custos em outros setores para se manter as metas de emissões para o país (ROCHEDO *et al.*, 2018). Além das emissões relativas às mudanças de uso do solo, o aumento da área plantada e a necessidade de uma maior produtividade, aumenta a demanda por fertilizantes, que possuem alto fator de emissão de GEE (ANGELKORTE, 2019).

Sob a ótica das mudanças climáticas, o setor de energia possui uma relevância ainda maior do que o setor de mudanças de uso do solo, a nível global. Como pode ser visto na Figura 4, a soma das emissões para produção de eletricidade, produção de calor e outros fins energéticos é responsável por quase 35% das emissões de GEE globais. Quando considerado ainda o setor de transportes, esse valor representa quase a metade das emissões. Dessa forma, a configuração das fontes da matriz energética, e as

tecnologias empregadas na produção de energia global tem relação direta com o nível de emissões.

Dessa forma é necessário que ocorra uma transformação da oferta de energia através do uso de alternativas tecnológicas para mitigação das emissões e descarbonização do sistema energético. Isso irá requerer um grande aumento da escala de produção de bioenergia e tecnologias de energias renováveis, além da utilização de tecnologias de remoção de carbono da atmosfera, como BECCS ou reflorestamento (ROGELJ *et al.*, 2018). Van der Zwaan *et al.* (2014) analisaram os recursos e tecnologias para diversos cenários de redução de CO_2 até 2050 para a América Latina, apontando que o potencial hidroelétrico poderia ser aumentado tipicamente até 50% e ressaltando o papel importante da biomassa no fornecimento de energia renovável.

No caso do Brasil é observado um grande potencial do uso de biomassa em usinas de energia em combinação com o CCS, capaz de produzir emissões negativas de CO2 (ROCHEDO *et al.*, 2016, TAGOMORI, *et al.*, 2018, VAN DER ZWAAN *et al.*, 2014). As emissões negativas desempenham um importante papel e são frequentemente indispensáveis nas projeções de cenários climáticos compatíveis com um mundo de 2,0°C ou 1,5 °C (MINX *et al.*, 2017, RAU *et al.*, 2018, ROGELJ *et al.*, 2018). Diversos autores, contudo apontam para os impactos que o uso extensivo de BECCS pode ter sobre o uso do solo e o uso de água (STENZEL *et al.*, 2019, VUUREN *et al.*, 2015). Nesse sentido, RAU *et al.* (2018) estudaram o potencial do método de combinação de eletrólise de água salina com intemperismo mineral a partir do uso de fontes renováveis, como uma possível alternativa tecnológica que resultaria em emissões negativas e menor impacto sobre a água e o uso do solo.

O aumento projetado da bioenergia configura-se em um importante ponto de interseção do nexo CLEW, uma vez que as projeções climáticas de modelos integrados dependem largamente dessa opção tecnológica para chegarem em uma solução viável em termos de emissões. Por outro lado, o maior uso de bioenergia pressiona os recursos hídricos, principalmente pela maior necessidade de irrigação das culturas bioenergéticas e na sua utilização na conversão em energia. Na Figura 5 pode ser observado o uso de água global para produção de energia para um cenário de novas políticas[7], mostrando que é esperado até 2035 um aumento no consumo de água, liderado principalmente pelo

[7] O cenário de novas políticas da IEA (2012) é compatível com um cenário de aumento da temperatura média da terra de 4°C, que supõe a continuidade de políticas voltadas para redução de emissões no setor energético

crescimento dos biocombustíveis. É possível notar também que o carvão segue sendo o principal usuário de água a nível global, apesar de ser observado um aumento considerável na relevância na retirada para bioenergia e para biocombustíveis.

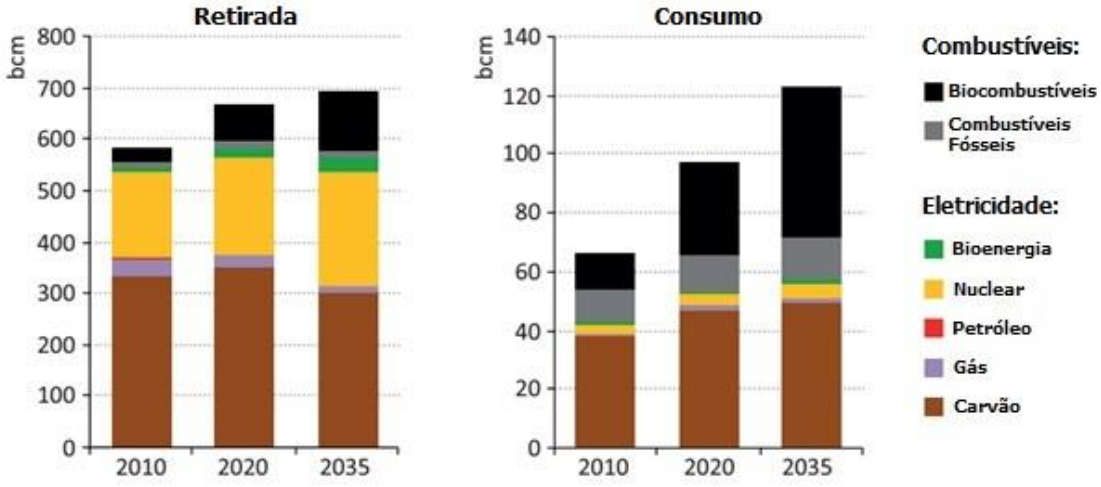


Figura 5: Uso de água global para produção de energia em cenário de novas políticas

Fonte: adaptado de IEA (2012)

O ciclo hidrológico também está diretamente vinculado às mudanças de temperatura da atmosfera e ao balanço de radiação (WALLACE E HOBBS, 2016; ANA, 2016). A água é a maior responsável pela regulação do clima, processos de evapotranspiração e variações nos regimes de chuva e seca e padrões de precipitação (BATES *et al.*, 2008). A mudança do clima está afetando onde, quando e em que proporção este recurso estará disponível (NOAA, 2019). Dentre os impactos mais significativos que afetarão a vida da população humana destaca-se a variação da precipitação, mudando o regime de chuvas e disponibilidade de água em diferentes regiões (MARENGO *et al.*, 2011, MARENGO e SOUZA JR, 2018, SALATI *et al.*, 2010).

A elevação da temperatura média global como consequência do aumento da concentração de GEE também vem causando impactos devastadores sobre a terra, incluindo incêndios florestais de grandes proporções, mudanças na precipitação e ondas de calor (IPCC, 2019a). Segundo o Relatório sobre Uso do Solo (AR6) do IPCC, impactos adicionais irão prejudicar a capacidade da terra de agir como um sumidouro de carbono (IPCC, 2019a).

Com o aumento de eventos extremos, situações como alteração da frequência e intensificação de secas e enchentes, o agravamento de situações de escassez hídricas é

esperado em diferentes regiões do planeta. O derretimento de geleiras, aumento do nível do mar e acidificação dos oceanos são consequências previstas que impactarão não apenas os seres humanos, mas também os ecossistemas terrestres, representando riscos de perda de biodiversidade e impactos sobre a produção de alimentos. Na Figura 6 podem ser vistos um resumo dos impactos previstos para diferentes regiões da América Central e América do Sul em relação a precipitação, escoamento, agricultura, cobertura de florestas e extensão de vetores de doenças e pragas. Na região Nordeste do Brasil, o aumento da temperatura deve levar a uma redução tanto na precipitação e no escoamento de água, quanto na cobertura florestal, acompanhado de uma intensificação no uso do solo para atividades agrícolas

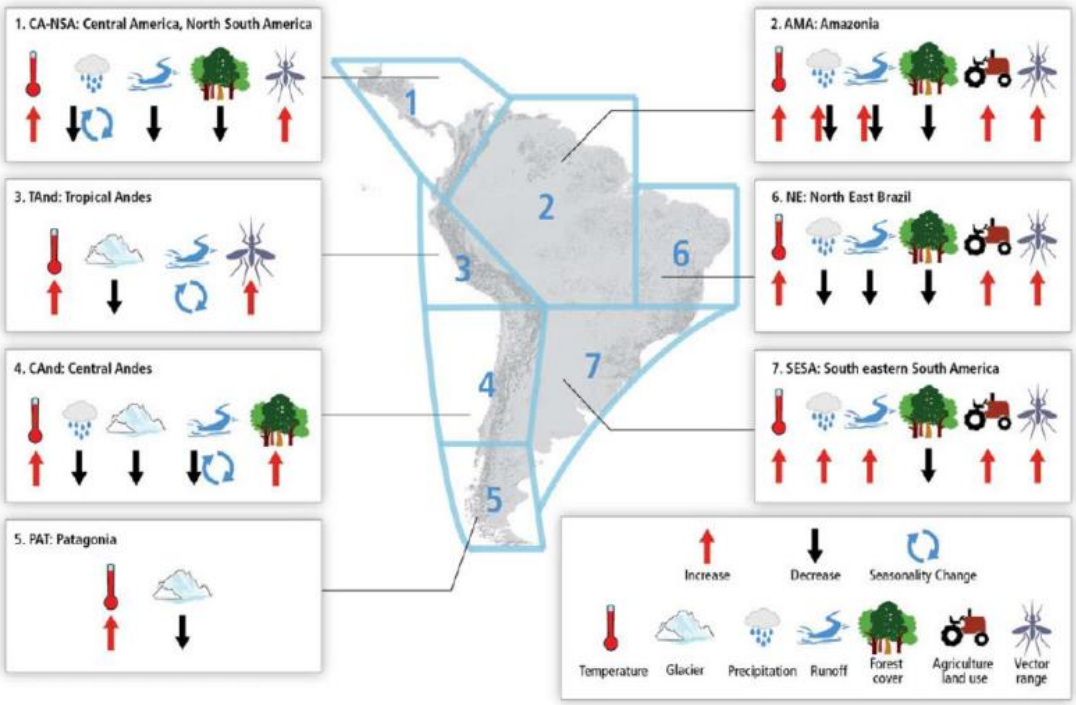


Figura 6: Alterações Climáticas previstas para a América Latina

Fonte: IPCC (2014)

Dessa forma, o presente trabalho terá um enfoque nos efeitos provocados nos recursos hídricos e de que maneira eles estão conectados e podem afetar as dimensões de segurança alimentar e energética. É importante notar que os efeitos estão conectados: o aumento da concentração de GEE na atmosfera, decorrente das emissões das mudanças de uso e do setor energético resultam em mudanças drásticas dos comportamentos climáticos, que por sua vez afetam a disponibilidade de recursos hídricos para irrigação, que afeta diretamente às atividades relacionadas ao uso do solo.

Este trabalho não focará no estudo da variação da disponibilidade hídrica como decorrência da mudança do clima, e sim como as alternativas tecnológicas de mitigação de emissão de gases de efeito estufa podem impactar os recursos hídricos.

A importância da água para a garantia da segurança alimentar foi discutida por Malekian *et al.* (2017) sob diferentes perspectivas. Os autores apontam que na literatura há vieses que abordam a água para garantia da segurança alimentar a partir do perigo representado por eventos críticos, como seca e inundações. Outra abordagem diz respeito às relações entre as diversas partes interessadas na cadeia de produção alimentar, visando a garantia do seu abastecimento. Há também uma extensa literatura que aborda as interações entre sistemas alimentares, água e nutrição (LUNDQVIST *et al.*, 2015, SMITH, MYERS, 2018) e mais recentemente há uma discussão crescente sobre os hábitos alimentares e os impactos de dietas sobre o uso do solo e as mudanças climáticas (ARAÚJO, 2020, CUNHA, 2019, DI PAOLA, *et al.*, 2017, JALAVA*et al.*, 2014, RANGANATHAN*et al.*, 2016, RIDOUTT, *et al.*, 2017, ROSENZWEIG *et al.*, 2020, WELLESLEY *et al.*, 2015).

A garantia da segurança energética depende diretamente da disponibilidade de água, uma vez que esse recurso é essencial para todas as fases da produção de energia, de combustíveis fósseis a biocombustíveis e usinas de energia (IEA, 2016). A relação inversa também é verdadeira, uma vez que a energia também é necessária para garantia da segurança hídrica, tendo em vista a sua necessidade nos processos hídricos como distribuição de água, tratamento de águas residuais e dessalinização (IEA, 2016, VANHAM, 2016).

Assim, as interações apresentadas serão estudadas nesta dissertação com foco nas particularidades para o Brasil.

2.2. Impactos sobre recursos hídricos no Brasil

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível observar a matriz energética brasileira. Observa-se uma significativa parcela de energias renováveis, com destaque para os derivados da cana, que representam 17¨% da fonte de energia primária no país e demandam quantidade significativa na etapa de irrigação dos cultivos bioenergéticos. É importante notar também a parcela da energia hidráulica, relativa a elevada participação das usinas hidrelétricas na geração de eletricidade no país. Por outro

lado, as fontes de carvão e nuclear, que possuem um significante uso de água globalmente, conforme mostrado na Figura 5, aparecem em menor proporção na matriz brasileira.

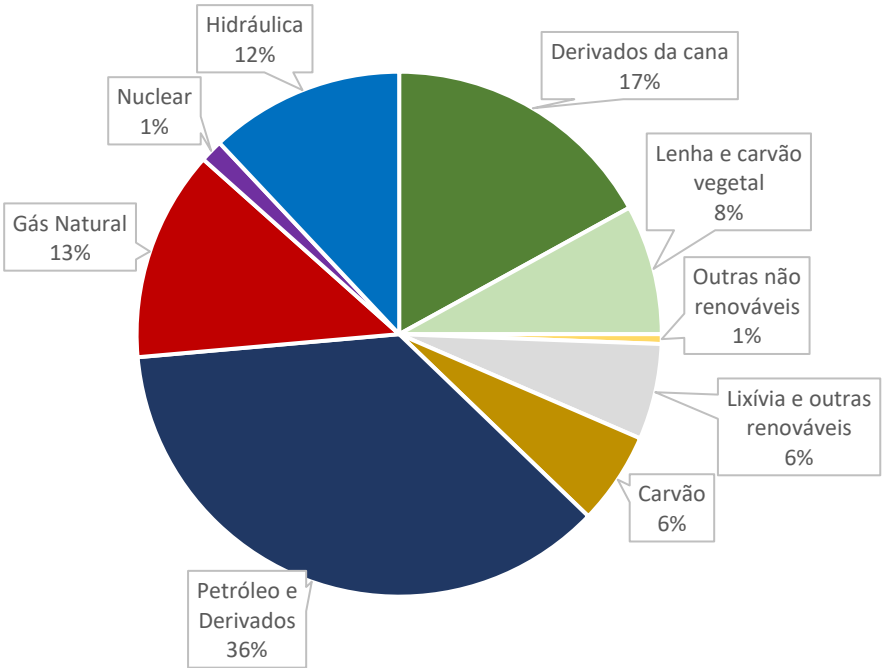


Figura 7: Matriz Energética Brasileira

Fonte: adaptado de BEN (2018)

Ao se olhar para as emissões brasileiras na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, nota-se que o setor de mudança de uso da terra e florestas possui historicamente a maior participação das emissões, cuja redução observada entre 2005 – 2012 esteve relacionado diretamente com o controle das taxas de desmatamento através de diversas políticas nacionais (ROCHEDO *et al.* 2018).

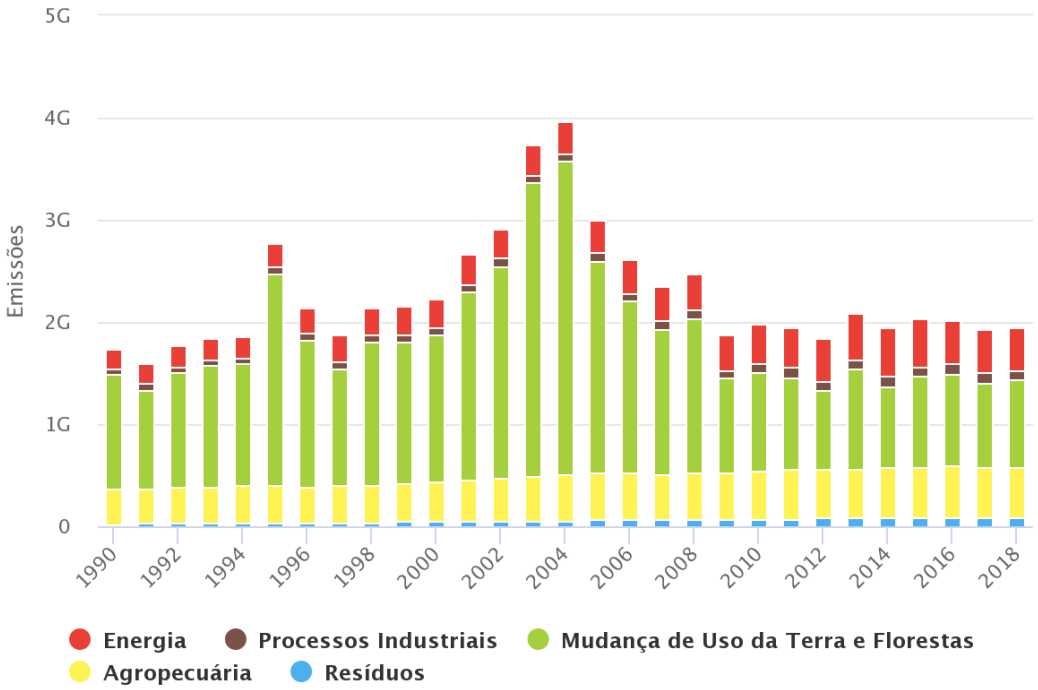


Figura 8: Evolução das emissões totais no Brasil entre 1990 -2018

Fonte: SEEG (2020)

A NDC[8] Brasileira apresentada à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) se comprometeu com uma meta de redução das suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025. Além disso, indicou uma contribuição subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, em 2030 (BRASIL, 2015). Essa meta é chamada "*economy-wide*" e, portanto, se aplica a todos os setores da economia, todavia, não estabelece metas setoriais. NORTHROP *et al.* (2016) aponta que as oportunidades identificadas para o Brasil se encontram prioritariamente no setor de uso do solo através do controle do desmatamento, bem como atividades de restauração e reflorestamento e no aumento do uso de biocombustíveis com aumento da relevância agricultura de baixo carbono e resiliente.

As opções de mitigação apontadas para o caso do Brasil, portanto, envolvem diretamente o uso do solo, tanto no setor de florestas e agricultura, mas também sugere sua relevância para algumas das principais opções de menor custo apontadas para o setor energético. Tendo em vista as importantes interrelações demonstradas anteriormente

[8] Contribuição Nacionalmente Determinada (do inglês *Nationally determined Contribution)*

entre o uso do solo, energia, clima e água, torna-se fundamental compreender quais os possíveis impactos sobre os recursos hídricos para o cumprimento desta meta.

2.2.1. Conceitos

Com o intuito de balizar os principais conceitos no que se refere aos recursos hídricos que serão utilizados ao longo do estudo, a seguir serão apresentadas algumas definições.

a) **Recursos Hídricos** – o termo é usado para se referir a todas as formas de água disponíveis para qualquer tipo de uso. É classificado como água superficial ou água subterrânea. A água superficial é aquela disponível nos corpos de água acima da superfície do solo, são os curso d'água (rios), trecho de drenagem, reservatórios artificiais ou naturais, lagos e lagoas (ANA, 2015a). A água subterrânea é a água que ocupa a zona saturada do subsolo (UNESCO, 2002 *apud* ANA, 2015a) disponível nos aquíferos subterrâneos, exploradas frequentemente a partir de poços artesianos.

b) **Uso de água –** neste trabalho o termo uso de água é denominado de forma ampla, incluindo todas as formas de uso da água: consumo, retirada e retorno, conforme definidos a seguir. As finalidades de uso de água são definidas conforme os usuários, entre usuários consuntivos ou não consuntivos, definidos a seguir.

c) **Retirada de Água** – refere-se à captação de água junto a um corpo d'água, que permite o desvio de um determinado volume de água, para atender a qualquer finalidade de usos da água (ANA, 2015a). Neste estudo a retirada de água refere-se a toda demanda de água que é calculada para os usuários consuntivos.

d) **Consumo de Água** – o consumo de água refere-se à toda água que após a captação, não retorna ao corpo d'água. É definido como a diferença de uso da água entre a quantidade retirada e a que volta ao manancial (ANA, 2015a). Neste estudo, o consumo de água refere-se a parte da demanda de água calculada para os diferentes usuários que não retorna ao corpo hídrico. São exemplos, a perda de água por evaporação em sistemas

de resfriamento ou a água perdida através da evapotranspiração das plantas, para o setor agrícola.

e) **Retorno de Água** – neste trabalho o retorno de água é definido como a diferença entre a retirada e o consumo. Refere-se à água que retorna ao corpo hídrico. Também é referida como efluente.

f) Usuários consuntivos e não consuntivos – a finalidade do uso de água para usuários consuntivos que envolve necessariamente o consumo da água, como ocorre para irrigação, abastecimento humano e usos industriais (ANA, 2015a). Usuários não consuntivos são os usos da água em que não se considera haver um impacto significativo sobre a disponibilidade de água (ANA, 2015a). São exemplos de usuários não-consuntivos: navegação, pesca e lazer (ANA, 2019b). Neste estudo são considerados apenas os usos consuntivos de água.

g) **Disponibilidade Hídrica** - é uma estimativa da quantidade de água disponível para ofertar aos mais diversos usos, que para fins de gestão, considera um determinado nível de garantia. No caso adotado pela ANA, a disponibilidade nos trechos de rio corresponde à vazão de referência (ou de estiagem) Q95 (ANA, 2019c). A disponibilidade de água pode ser calculada de maneira distinta para casos específicos como trechos sob influência de reservatórios e lago do reservatório (ANA, 2019c).

h) **Vazão de Referência (Q95) e Vazão Média (Qm)** – é definido como o valor mínimo de vazão que deve ser ter garantido em 95% do tempo observado (ANA, 2019c). ANA (2015a) define como *"vazão determinada estatisticamente, para um certo período de observação num posto fluviométrico, correspondente a uma probabilidade de que naquela seção do curso d'água as vazões serão 95% do tempo maiores do que ela*". Enquanto isso, a vazão média é definida a partir da média aritmética das vazões diárias ao longo de todo período disponível da série de vazões (ANA, 2005)

i) **Escassez Hídrica** – refere-se a situações em que há falta ou insuficiência de água (ANA, 2015a).

j) **Outorga** - autorização do uso de recursos hídricos para intervenções que promovam a alteração na quantidade, na qualidade, ou no regime dos mesmos (ANA, 2015a).

k) **Balanço hídrico**

Outro conceito importante explorado neste estudo é o de estresse hídrico. O nível de estresse hídrico de uma bacia hidrográfica é determinado a partir do balanço quantitativo, comparando a oferta e a demanda por recursos hídricos. O indicador 6.4.2 do objetivo de desenvolvimento sustentável 6 (ODS 6), que versa sobre a garantia da disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento universal, define um índice de estresse hídrico. O cálculo é feito a partir da razão entre a retirada total de água por todos os principais setores e o total dos recursos hídricos renováveis (FAO, UN-WATER, 2018). No relatório da Conjuntura de Recursos Hídricos (ANA, 2013a) consta a versão utilizada pela ANA para o balanço quantitativo entre disponibilidade de oferta e demanda de recursos hídricos, com as classes indicativas para a necessidade de gerenciamento adotadas para o caso brasileiro conforme apresentado na Tabela 1. Para o cálculo do índice, a oferta considerada pela ANA é o valor de referência Q95 para definir a disponibilidade hídrica de cada bacia hidrográfica analisada.

Tabela 1: Balanço Hídrico Quantitativo

Índice	**Classificação**
< 5%	Excelente
5 a 10%	Confortável
10 a 20%	Preocupante
20 a 40%	Crítica
>40%	Muito Crítica

Fonte: adaptado de ANA (2013a)

2.2.2. Binômio Quantidade e Qualidade

As situações de vulnerabilidade hídrica derivam tanto do caráter quantitativo quanto do caráter qualitativo. As questões quantitativas devem-se em grande parte à distribuição desigual de recursos hídricos no mundo, mas assim como as questões

relativas à qualidade da água, ambas as situação também derivam da falta de um sistema de gestão adequado. HOEKSTRA (2003) pontua que o problema não é de falta de água doce no mundo, mas sim o atual padrão de uso da humanidade cuja configuração é inclinada para áreas no mundo de alto estresse hídrico.

A indisponibilidade do recurso hídrico pode ser tanto devido à qualidade, quanto à quantidade. O primeiro caso, ocorre quando o nível de poluição inviabiliza o consumo da água ou sua utilização para uma determinada atividade. Para finalidades como, por exemplo, o uso de água para abastecimento humano há requerimentos mínimos em relação a qualidade de água como pH, níveis de carga orgânica e presença de metais. Em relação ao segundo caso, ocorre quando existem usos competitivos que impedem a utilização simultânea de usuários para fins diversos.

Uma visão importante dentro da gestão de águas integrada é o entendimento de que o binômio quantidade – qualidade são indissociáveis, pois a deterioração na qualidade de água pode inviabilizar o seu uso para determinados fins, ainda que do ponto de vista quantitativo não haja limitações (SETTI *et al*, 2001).

O aumento da população em áreas urbanas aumentou a pressão localizada devido à grande densidade populacional nos centros urbanos. Estima-se que cerca de 54% da população global viva em áreas urbanas (BOSIRE *et al.*, 2017). No Brasil, o diagnóstico consolidado em 2010 indicava que 46% das cidades brasileiras tinham vulnerabilidades associadas à produção de água e 9% necessitavam de novas fontes hídricas (ANA, 2017a). Somado a isso, apenas 53,2% da população é atendida com saneamento básico, o que resulta em situações graves de poluição das bacias hidrográficas brasileiras.

Apesar da grande importância de se olhar para qualidade da água tal componente não faz parte do escopo desse trabalho. Contudo, é importante ressaltar ainda que apenas a disponibilidade do ponto de vista quantitativo é insuficiente para garantir a disponibilidade dos recursos hídricos.

2.2.3. Conflitos pelo uso de água

A gestão dos recursos hídricos, conforme previsto pela Política Nacional de Recursos Hídricos, tem como unidade básica de gestão a bacia hidrográfica, sobrepondo-se ao conceito usual da divisão territorial político-administrativa existente. Do ponto de vista do gerenciamento das águas, essa divisão é essencial para garantir um planejamento integrado e coerente ao longo de todo o corpo d'água. Todavia, há diversas bacias hidrográficas que ultrapassam as fronteiras políticas pré-estabelecidas, o que pode levar

a situações em que os interesses e necessidades individuais de cada unidade política, sejam municípios, estados ou até países, não estejam em consonância, podendo originar situações de conflitos.

Nesse sentido, a Política Nacional de Recursos Hídricos prevê instrumentos importantes para auxiliar na gestão das águas (BRASIL, 1997). Dentre os instrumentos previstos destacam-se outorga, cobrança por uso da água, enquadramento e Plano de Recursos Hídricos. A outorga é um importante instrumento de gestão da demanda que garante ao usuário o direito de acesso à água. Seu objetivo é assegurar o controle qualitativo e quantitativo de maneira a evitar conflitos pelo uso da água. Para que seja eficaz, é imprescindível que seja implementado em conjunto com uma fiscalização adequada para garantia da aplicação do direito de uso (ANA, 2011).

2.2.4. Panorama do Uso de Recursos Hídricos no Brasil

No Brasil, a Agência Nacional de Águas estuda periodicamente o uso de água para 7 usuários consuntivos. São eles: Irrigação, Indústria, Termoelétrica, Mineração, Abastecimento Urbano, Abastecimento Rural e Abastecimento Animal. Na Figura 9 podem ser observados os principais usos para cada um dos usuários para o Brasil, mostrando a grande relevância da irrigação com 52% da retirada, seguido pelo abastecimento urbano (24%).

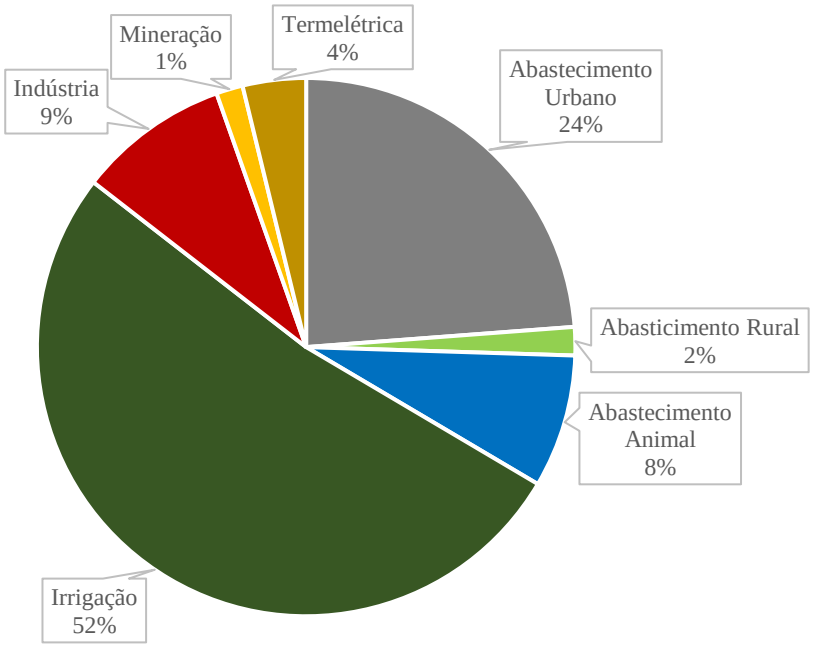


Figura 9: Retirada de água para os usuários consuntivos em 2017

Fonte: adaptado de ANA (2019a)

Para este estudo, além dos usuários previamente estudados em ANA (2019a), é considerado o setor de energia. O setor energético é representado em parte como usuário não consuntivo (setor hidrelétrico) e em parte como usuário consuntivo (restrito à termeletricidade) nas análises realizadas pela ANA. Dessa maneira, não existem atualmente estatísticas oficiais da participação completa do setor energético no uso dos recursos hídricos. Todavia, algumas tecnologias de produção/conversão de energia estão incluídas dentro de outros setores consuntivos, como por exemplo, culturas bioenergéticas como a cana-de-açúcar, soja e outras oleaginosas são atribuídas ao setor agrícola e não à energia. Além disso, a produção de petróleo, o processo em uma refinaria pode estar considerado no setor industrial. Isso ressalta a importância de conhecer a participação do setor de energia em relação ao uso da água (retirada e consumo) e a inter-relação destes com o uso do solo, setor industrial, pecuária e abastecimento humano.

Tendo em vista as proporções continentais do território brasileiro e a existência das mais diferentes condições edafoclimáticas, econômicas e sociais, é fundamental observar os diferentes usos de maneira regional. Nesta dissertação, as análises do uso de recursos hídricos serão feitas no nível das 12 regiões hidrográficas brasileiras. Assim, essa seção

traz uma breve análise sobre os principais aspectos de cada uma das regiões hidrográficas (RH) brasileira, separadamente.

Na tabela abaixo encontra-se um resumo das principais características regiões das hidrográficas brasileiras. É possível notar que assim como a população do país é distribuída de forma heterogênea, com 58% de sua população localizada em uma faixa de 200 km do litoral (IBGE, 2017), a disponibilidade de água oferecida no território nacional também não ocorre de maneira uniforme. Enquanto a maior oferta de recursos hídricos está na Região Norte, tendo a Bacia Amazônica 73,6% dos recursos hídricos superficiais do país (ANA, 2005), segundo o Censo do IBGE de 2010 apenas 5% da população brasileira vive no território que abrange a sua maior bacia hidrográfica (ANA, 2015b).

Tabela 2: Resumo das características gerais das regiões hidrográficas brasileiras

Região Hidrográfica	**RH**	**Área (km^2)**	**Vazão Média Qm (m^3/s)**	**Q95 (m^3/s)**	**População Urbana**	**População Rural**	**População Total**
Amazônica	AMZ	3.879.207	132.145	73.748	7.086.766	2.607.962	9.694.728
Tocantins-Araguaia	TOC	920.087	13.779	5.447	6.530.567	2.042.149	8.572.716
Atlântico Nordeste Ocidental	AOC	274.350	2.608	320	3.791.444	2.452.975	6.244.419
Parnaíba	PRB	331.442	767	379	2.692.256	1.460.609	4.152.865
Atlântico Nordeste Oriental	AOR	286.761	774	92	19.167.761	4.909.567	24.077.328
São Francisco	SFO	638.232	2.846	1.886	11.012.368	3.277.585	14.289.953
Atlântico Leste	ALT	388.160	1.484	305	11.244.498	3.822.045	15.066.543
Atlântico Sudeste	ASD	214.629	3.178	989	25.996.689	2.239.747	28.236.436
Paraguai	PRG	362.259	2.359	782	1.881.491	284.447	2.165.938
Paraná	PRN	879.860	11.831	5.956	57.129.938	4.160.334	61.290.272
Uruguai	URU	174.412	4.103	565	2.923.614	999.259	3.922.873

Atlântico Sul	ASU	186.673	4.055	647	11.417.069	1.559.485	12.976.554

Fonte: Elaboração própria baseada em (ANA, 2015b)

O fato de o território brasileiro ter uma proporção continental, com 8,5 milhões de km² (ANA, 2015b), implica em uma grande variação na precipitação média anual de acordo com cada região do país. As duas maiores bacias hidrográficas do ponto de vista de disponibilidade de recursos hídricos, Amazônica e Tocantins-Araguaia, são as que também apresentam os maiores índices pluviométricos anuais do país: 2.239 mm e 1837 mm, respectivamente. Enquanto que as regiões que apresentam estresse hídrico ou baixa vazão coincidem com as regiões marcadas por um baixo índice pluviométrico anual, como são os casos da Bacia do São Francisco, com 1.037 mm; Atlântico Leste, com 1.058 mm e Parnaíba, com 1.117 mm (ANA, 2015b). Na Figura 10 pode ser observado um panorama do índice de balanço hídrico das regiões. É perceptível que a bacia que se encontra em estado mais crítico é a Região do Atlântico Nordeste Oriental, podendo ser identificados situações preocupantes nas regiões do Atlântico Sul, Atlântico Leste e São Francisco.

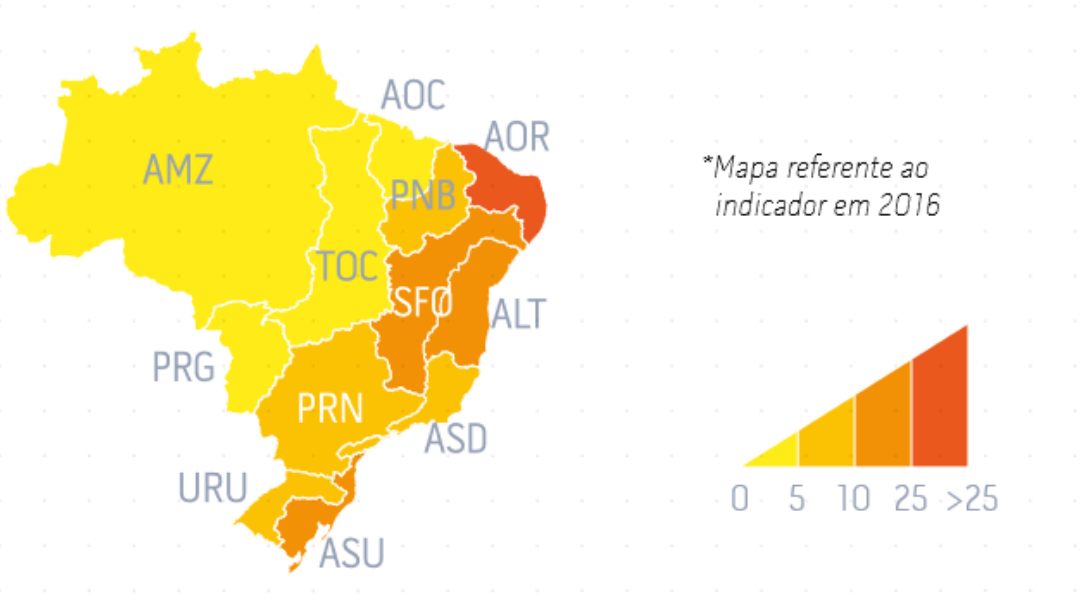


Figura 10: Balanço Hídrico por Região Hidrográfica

Fonte: (ANA, 2017a)

Na Figura 11 podem ser observados a predominância dos diferentes usos dos recursos hídricos nas regiões hidrográficas brasileiras. Bacias como São Francisco, Atlântico Leste e Parnaíba, onde o regime de chuvas é inconstante e apresentam os

menores índices pluviométricos, são bacias com alta porcentagem de uso para a irrigação. Enquanto na região onde há expansão da pecuária bovina, no Centro-Oeste e na transição entre o cerrado e a Floresta Amazônica, é possível observar as maiores porcentagens de uso de água para uso animal no balanço dos usos para a Bacia do Paraguai e a Bacia Amazônica. Na Bacia do Paraná, que abriga a maior parte do estado de São Paulo, o índice de uso de água para o setor industrial é o maior do país.

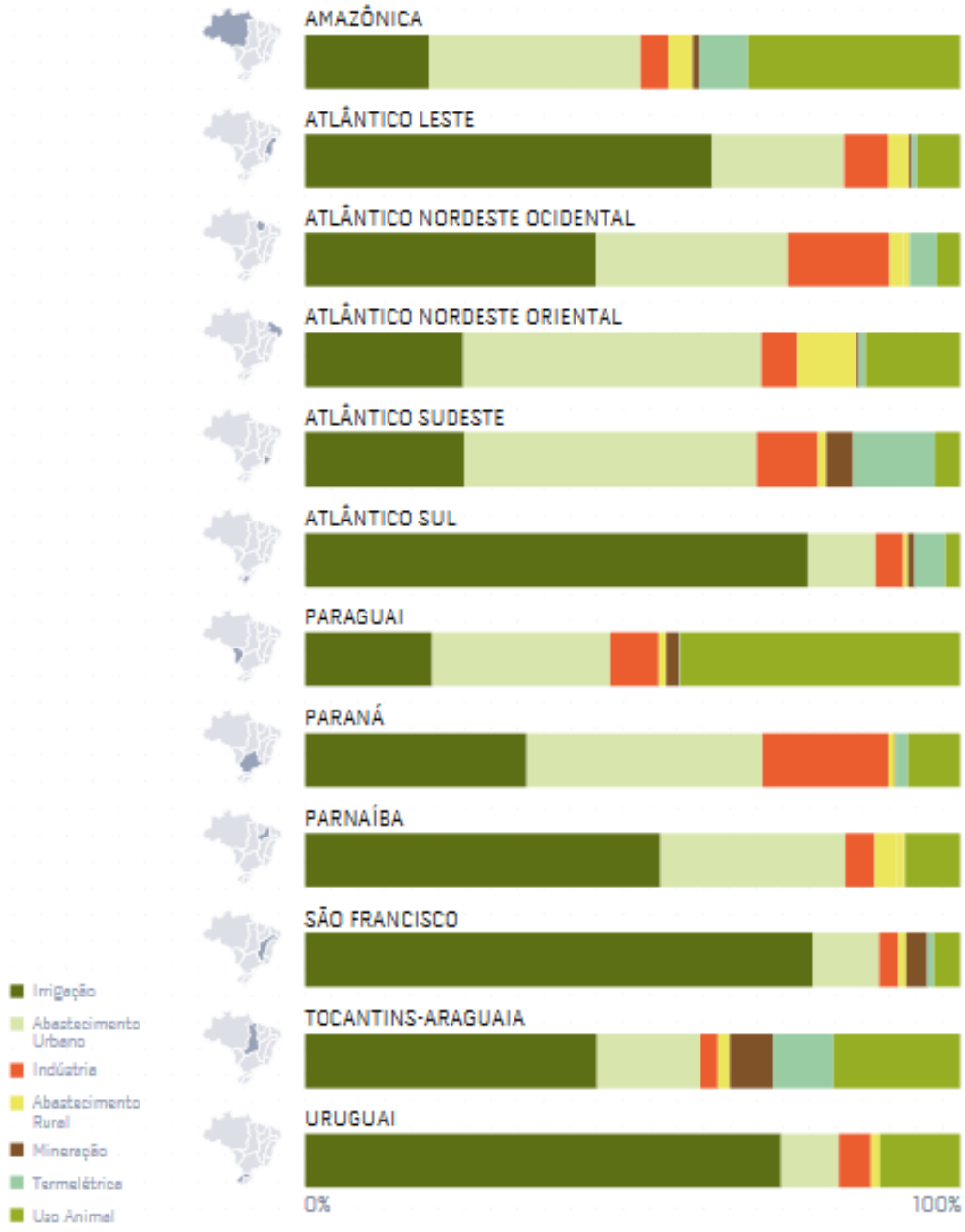


Figura 11: Uso de água para os diferentes setores por região hidrográfica

Fonte: (ANA, 2017a)

A Bacia Amazônica não só apresenta 18% da disponibilidade mundial de água doce se levado em conta as contribuições de vazões em território estrangeiro (ANA, 2005), como também possui o rio com maior extensão do mundo, o Solimões/Amazonas, que é o rio que contribui com a maior descarga de água doce no oceano (MMA, 2006). Essa RH detém atualmente o maior potencial hidroelétrico brasileiro, apesar de apenas deste 5% do potencial hidrelétrico da Região Norte esteja sendo explorado atualmente. Contudo, a expansão nessa área enfrenta grandes desafios pois estão localizados, em grande parte, em áreas com interferência em povos ou terras indígenas e em unidades de conservação (EPE, 2018).

Uma das principais atividades econômicas da Bacia Amazônica é a pecuária bovina que está associada ao desmatamento de grandes áreas. Outras atividades econômicas da região são a indústria de transformação, a agroindústria, a exploração madeireira e a exploração de gás e petróleo (MMA, 2006d). Apesar de ocupar 60% do território nacional, o PIB dessa região representa cerca de 5% do PIB total. A pecuária é a atividade econômica responsável pelo maior consumo de água dessa bacia, porém apresenta altos índices de degradação dos solos e da floresta (MMA, 2006d).

A Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia possui grande relevância do uso para irrigação, que corresponde a 62% da retirada de água nessa região. Isso ocorre, pois a região abriga a principal área de expansão da fronteira agrícola, que ocorre com foco no cultivo de grãos (ANA, 2015b). Essa bacia apresenta a segunda maior disponibilidade hídrica do Brasil, representando 6% da disponibilidade nacional com um regime de chuvas próximo à média nacional.

Os principais cultivos são o arroz, soja, milho, algodão e feijão. Por ser uma área de expansão agrícola, a área irrigada tende a subir de acordo com o crescimento da área cultivada (ANA, 2015b). É válido ressaltar o papel da irrigação no aumento da produtividade das culturas, que pode aumentar de 2,5 a 4 vezes (MMA, 2006i). Todavia essa prática de maneira extensiva pode impactar substancialmente pequenos cursos de água (MMA, 2006i).

Essa bacia possui o maior índice percentual de uso da água para a mineração dentre todas as outras bacias hidrográficas brasileiras, por abrigar a maior parte das reservas nacionais de outros minerais importantes como amianto, cobre, níquel, ferro, manganês e bauxita (ANA, 2015b).

A Bacia Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental compreende uma região entre os estados do Pará e Maranhão onde predomina um bioma de transição entre cerrado e floresta amazônica. O principal uso de água dessa bacia é o abastecimento urbano, que representa 48% de seu uso total (ANA, 2015b). O uso industrial também é significativo nessa região por contar com o Distrito Industrial de São Luís, onde estão instaladas a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e a Alumínio do Maranhão (Alumar) (ANA, 2015b).

O uso do solo nessa bacia muitas vezes acontece de maneira inadequada, como em práticas agrícolas de plantio de soja e arroz, que resultam em processos erosivos e salinização do solo. Um alto índice de desmatamento também pode ser observado nessa região o que pode comprometer o bioma já que a maior parte do regime de precipitação dessa bacia depende da evapotranspiração de sua vegetação. A disponibilidade de água também é afetada pelos altos índices de poluição de seus rios, devido ao lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais provenientes da mineração e siderurgia (ANA, 2015b).

A Bacia Hidrográfica do Parnaíba está em grande parte localizada no semiárido brasileiro, com um dos menores índices pluviométricos do país (ANA, 2015b). Essa bacia apresenta um cenário de distribuição desigual dos seus recursos hídricos. Isso acontece pelo fato de a maioria dos afluentes da margem direita do Rio Parnaíba, principal rio da bacia, apresentarem caráter temporário. Essa característica da disponibilidade de água está relacionada diretamente com a dificuldade de desenvolvimento da região do semiárido (ANA, 2015b).

Devido ao baixo regime de chuvas, o principal uso da água Na Bacia do Parnaíba vai para a irrigação, que atinge o índice de 73% da demanda hídrica, conforme observado na Figura 11. O abastecimento urbano representa 16% da demanda (ANA, 2015b). A falta de condições adequadas de saneamento implica na poluição de alguns rios devido o lançamento de esgoto sem tratamento nas águas, o que prejudica ainda mais o balanço quali-quantitativo dessa região.

A escassez de água é um problema frequente na região, sobretudo à margem direita do Rio Parnaíba, de modo que a região com maior desenvolvimento da agropecuária, principal atividade econômica na RH, são as margens dos principais rios e o delta do Parnaíba. O destaque fica para a agricultura da soja, arroz, feijão, milho, caju,

algodão e cana-de-açúcar. Na pecuária destacam-se a bovinocultura, caprinocultura e avicultura (MMA, 2006g).

A Bacia Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental apresenta a maior parte de seu território na região do semiárido nordestino, com um índice pluviométrico muito baixo e uma alta evaporação (ANA, 2015b). A região depende diretamente do regime de chuvas, que é intermitente, gerando uma instabilidade de recursos que pode ser apontado como uma das causas pelo histórico êxodo de sua população (ANA, 2015b).

Uma medida comum para tentar sanar o problema das secas constantes é a construção de açudes para abastecimento público. Outra medida mais atual é o Projeto de Integração do Rio São Francisco, que visa transpor recursos hídricos da Bacia do São Francisco para suprir a escassez manancial da Bacia do Atlântico Nordeste Oriental. Esse projeto levanta muitos questionamentos a respeito dos efeitos que podem causar no bioma e quais seriam os seus impactos ambientais em médio e longo prazo; por outro lado, visa resolver um grave problema hídrico e socioeconômico.

A qualidade da água nessa bacia é baixa devido a uma série de motivos. Nos açudes as altas concentrações de fósforo indicam risco de eutrofização, colocando em risco uma das únicas fontes de água do semiárido nordestino. O lançamento de esgotos domésticos e efluentes industriais nas áreas metropolitanas também compromete a qualidade dos rios dessa bacia. Outro agravante é em relação às indústrias de açúcar e álcool, que ainda lançam uma quantidade grande de vinhoto e demandam uma quantidade significante de água para a irrigação.

A Bacia Hidrográfica do São Francisco está localizada em sua maior parte em áreas do semiárido brasileiro, que apresentam um dos menores índices pluviométricos do país e uma alta taxa de evapotranspiração, fazendo o Rio São Francisco imprescindível para a sobrevivência das populações dessa região do Brasil devido à grande vazão de retirada proporcionada pelo rio, que é de 278,8 m^3/s, representando 9,8% da demanda brasileira (ANA, 2015b).

A irrigação é o principal destino do uso da água dessa bacia, contabilizando 69% da vazão de retirada. (MMA – 2006). FAO (2016) aponta que a área irrigada dessa bacia representava 26% de toda área irrigada do Brasil. No Médio São Francisco as principais culturas são as da soja, milho e feijão; no Sub-médio, as frutíferas, enquanto no Alto São Francisco a cana-de-açúcar aparece como principal cultura. De 2006 a 2012 a Bacia do

São Francisco apresentou um aumento considerável de sua área irrigada, chegando a um valor de 39% de expansão (ANA, 2015b).

O potencial hidroelétrico também é um ponto notável dessa bacia, já que ela possui um total de 12% da geração de energia do país. Porém como muitos afluentes do São Francisco são intermitentes, a vazão dessa bacia sofre grandes variações durante o ano, maiores entre janeiro e março e menores entre setembro e outubro (ANA 2005).

A Bacia Hidrográfica do Atlântico Leste tem como principal demanda a irrigação, que representa 47% de sua retirada de água, seguido do abastecimento urbano, com 31% (ANA, 2015b). Existe uma grande diversidade de culturas espalhadas pelas terras dessa RH, porém a cana-de-açúcar está presente na maior parte das áreas cultiváveis. Outras culturas de destaque são: café, milho, feijão, batata inglesa, manga, maracujá, mamão mandioca e coco-da-baía (ANA, 2015b).

A qualidade da água é pior próxima ao litoral, onde observa-se uma maior concentração urbana e consequentemente um maior lançamento de efluentes industriais e domésticos, sobretudo nas regiões metropolitanas. Esse fator se agrava mais ao notar que a RH do Atlântico Leste possui a segunda menor oferta hídrica do país (ANA, 2015b).

A Região Hidrográfica do Paraná abrange 10% do território nacional nas áreas de maior desenvolvimento econômico do país, portanto não é coincidência que tenha as maiores demandas por água de todo o Brasil sendo a RH com o maior índice percentual de retirada de água para o uso industrial (ANA, 2015b).

A demanda hídrica dessa bacia corresponde a 25% da vazão total outorgada no Brasil (ANA, 2019c), sendo um dos maiores índices de retirada localizados nas áreas metropolitanas, como São Paulo, Campinas, Curitiba, Goiânia e Distrito Federal (ANA, 2015b). O valor significativo deve-se a alta demanda industrial, já que os maiores polos industriais do país se localizam sob o domínio dessa Região Hidrográfica.

A irrigação na RH do Paraná corresponde a 36,3% de toda área irrigada no Brasil, sendo a Região Hidrográfica com a maior irrigação do país, sobretudo nos estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais. O plantio da cana-de-açúcar para a produção de álcool e açúcar, bem como a necessidade de irrigação vem se expandindo, em 2013 a área plantada desse cultivo chegou a 1.087.924 hectares (ANA, 2015b).

Essa bacia é a que possui o mais elevado aproveitamento de potencial elétrico do país com cerca de 68,4% do seu potencial aproveitado. Somente a Usina de Itaipu opera com 7.000 MW levando em conta apenas a parte brasileira (ANA, 2015b). A qualidade

de água é um ponto crítico, sendo registrados os piores índices próximos às metrópoles e centros industriais, melhorando à medida que se afastam deles (ANA, 2015b).

A Bacia do Alto Paraguai cobre a maior área úmida contínua do planeta, o Pantanal. A principal atividade econômica dessa região é a agropecuária, em especial a pecuária extensiva. A agricultura é mais forte na região de planalto, onde são cultivadas grandes safras de soja, milho, cana-de-açúcar e algodão (ANA, 2015b). Apesar da importância da agricultura, é a pecuária a maior consumidora da água dessa Região Hidrográfica apresentando o maior percentual de retirada de água para uso animal, observado na Figura 11.

A Região Hidrográfica Atlântico Sudeste é a segunda RH mais populosa e possui uma enorme diversidade de atividades econômicas, com um importante setor industrial, fazendo dessa região uma das mais desenvolvidas economicamente do país. Por conta de sua grande concentração populacional, o abastecimento urbano é responsável pela maior parcela da retirada de água, correspondendo a 49% de sua retirada total. A irrigação, com 27%, e o setor industrial, com 20%, também compõe significativamente essa estatística (ANA, 2015b).

A qualidade da água também é um ponto crítico em especial nas áreas próxima às grandes metrópoles como Vitória e Rio de Janeiro, de maneira semelhante ao que ocorre na Bacia do Paraná. Isso pode ser explicado pelos baixos índices de saneamento e a poluição gerada pelos efluentes industriais e o desmatamento (ANA, 2015b). Apesar do problema de qualidade nos grandes centros urbanos, essa bacia apresenta 85% dos cursos de seus rios com condições satisfatórias segundo a ANA em seu levantamento feito no ano de 2013.

A Região Hidrográfica do Atlântico Sul é uma área de grande concentração populacional e desenvolvimento econômico. A principal demanda por água está na irrigação, que detém 66% da retirada desse recurso. O setor industrial representa 19% (ANA, 2015b). A principal responsável pelas altas taxas de irrigação dessa bacia é a rizicultura muito praticada nas regiões da Lagoa dos Patos, Lagoa Mirim e Rio Guaíba, causando situações de criticidade quanto ao abastecimento hídrico (ANA, 2015b).

Na fronteira entre Brasil, Argentina e Uruguai, a Região Hidrográfica do Uruguai representa uma importância no cenário nacional devido ao seu potencial hidroelétrico e as suas atividades agroindustriais. Contudo, essa é uma RH com criticidade nos níveis quantitativos. O índice de 82% de sua retirada de água para a irrigação conflita com o uso

para abastecimento urbano. O cultivo de arroz por inundação é o principal fator pelo elevado percentual de retirada (ANA, 2015b).

2.3. Análise integrada do nexo

Com o intuito de avaliar as diferentes interações apresentadas na Seção 2.1, será utilizado um modelo de avaliação integrada (IAM) como ferramenta para projeção de cenários climáticos. A seguir, alguns conceitos importantes são explicados e é feita uma breve contextualização sobre o modelo utilizado neste estudo.

2.3.1. Cenários Climáticos

O Acordo de Paris, ratificado em 2015 por 197 Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (UNFCCC), estabeleceu a meta de alcançar até o final do século um aquecimento global de 2,0°C em relação ao período pré-industrial, e fazer esforços para 1,5°C.

O IPCC, que reúne os cientistas de todas as partes do mundo vêm desenvolvendo ciclos de relatórios, chamados "*Assessment Report"*, em que trazem diagnósticos sobre a situação atual em relação às mudanças climáticas e projeções para o futuro e seus potenciais impactos. A metodologia atual utilizada pelo IPCC, no AR5 para analisar os cenários futuros é descrita pelos *Shared Socio-economic Pathways* (SSPs) que contém referências para elaboração de cenários.

Os *SSPs* consistem em narrativas para a elaboração de cenários em que são combinados diferentes níveis de desafios para as vertentes de mitigação e adaptação. No total foram desenvolvidos cinco cenários, que podem ser observados na Figura 12. O cenário SSP1 é denominado "*Taking the green road"*e refere-se a um cenário em que o mundo muda gradualmente de forma mais sustentável, com respeito aos limites ambientais. O SPP3 denominado*"A rocky road"* incorre em altos desafios para mitigação e para adaptação e pressupõe direcionamento de políticas para questões regionais e nacionais. O SSP 4 chamado *"A road divided"* considera uma situação de forte desigualdade, em que crescem as disparidades em oportunidades econômicas e poder político entre as regiões. O SSP 5, designado *"Taking the highway"* baseia-se em um desenvolvimento baseado no combustível fóssil e pressupõe um crescimento rápido da economia global impulsionado pelo sucesso das economias industrializadas. (CUNHA, 2019, RIAHI *et al.*, 2016).

O cenário SSP2 chama-se *"Middle of the road"* refere-se a um cenário de desafios intermediários tanto para mitigação quanto para adaptação. Essa narrativa considera que o mundo segue um caminho em que as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não sofrem mudanças marcantes em relação ao padrão histórico. Nesse cenário, as instituições caminham no sentido dos ODS com um progresso lento. O crescimento da população global é moderado e se nivela na segunda metade do século.

Figura 12: Trajetórias sócio econômicas (SSPs)

Fonte: RIAHI, *et al.*, (2016)

O estudo de cenários permite comparar uma série de projeções e testar narrativas construídas com base em um conjunto de premissas e hipóteses. Portanto, não consiste em uma previsão e sim uma projeção para fins de estudo e suporte na tomada de decisão. Na Figura 13 podem ser vistas as tendências para as mudanças de uso do solo para três dos SSPs. No SSP2, por exemplo, observa-se um forte crescimento de bioenergia e áreas de floresta ao longo de todo período e uma acentuada redução da área de pastagem.

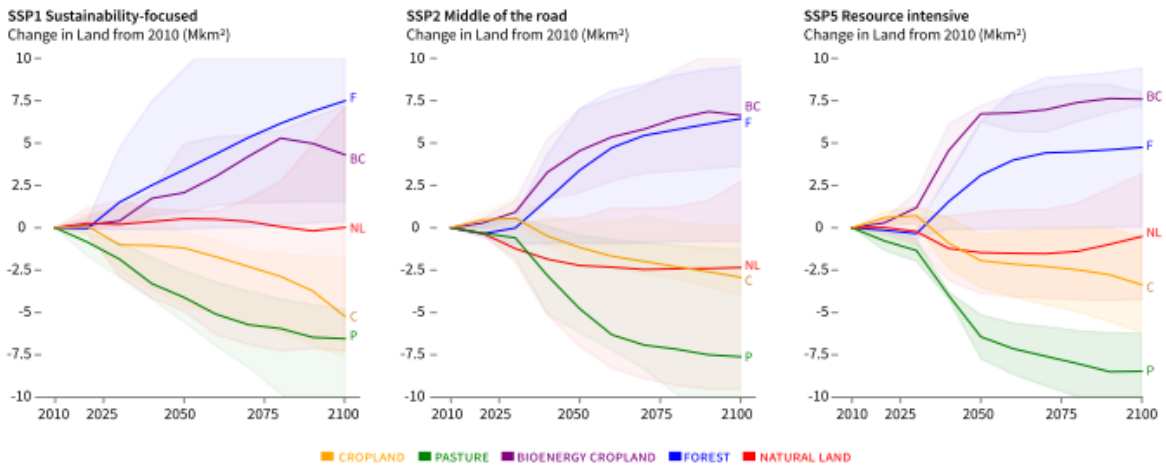


Figura 13: Mudanças no uso do solo para cenários de mudanças climáticas

Fonte: (IPCC, 2019b)

2.3.1. Orçamento de Carbono

O orçamento de carbono é um conceito utilizado para estimar a quantidade de carbono que é possível ser emitida para atmosfera, relacionando-a com um determinado grau de aquecimento médio da temperatura terrestre. A ideia de um orçamento de carbono baseia-se no fato de que há uma forte relação entre emissões cumulativas e temperatura em modelos climáticos (GILLET *et al.*, 2013). Dessa forma, uma vez que ambas as variáveis estão correlacionadas, é possível calcular, a partir do conhecimento e análise de estimativas individuais, de países ou empresas, qual seria a quantidade total de emissão de GEE possíveis, ou qual seria o orçamento de carbono, para se atingir um aquecimento dentro do limite de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, por exemplo, conforme proposto no Acordo de Paris.

Na Figura 14 pode ser visto um levantamento de diversos autores para faixas de orçamentos de carbono. É possível reparar que há uma variação significativa dos valores encontrados na literatura.

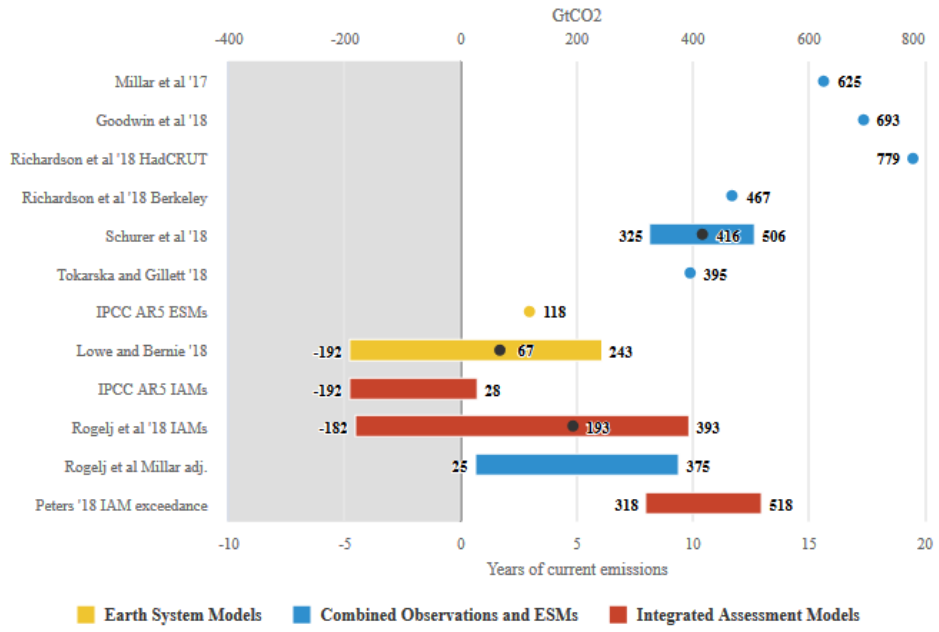


Figura 14: Orçamento de Carbono na literatura

Fonte: Carbon Brief (2018)

Apesar de serem largamente usados como referência para criação de cenários de emissões, são reportadas algumas limitações e problemas na assertividade dessa representação. Ao se definir um orçamento de carbono, associado a um nível de temperatura, é possível calcular a quantidade de emissões possíveis que levariam a uma determinada concentração de GEE na atmosfera. Contudo, a maioria dos modelos de IAM possuem opções tecnológicas que apresentam emissões negativas. Como o orçamento de emissões refere-se a um período longo, isso pode gerar uma distorção ao se olhar o resultado acumulado. Pois torna-se possível a ocorrência de períodos em que os picos que ultrapassem os limites de concentrações, que posteriormente são compensados através do emprego de tecnologias com emissões negativas (SOCOLOW *et al.*, 2011). Esse fenômeno é denominado "*overshooting*".

Há um conjunto extenso de trajetórias possíveis para se atingir as metas climáticas, que dependem não apenas das decisões e políticas públicas adotadas, mas também da viabilidade técnica e econômica de alternativas tecnológicas. Na Figura 15 podem ser vistos diferentes trajetórias possíveis para as emissões de carbono que consideram tempos diferentes para se atingir a neutralidade carbônica e requerem diferentes níveis de bioenergia e captura de carbono.

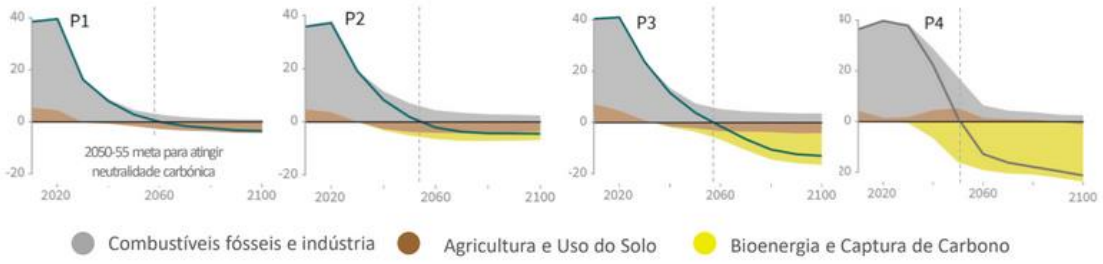


Figura 15: Trajetórias de emissões segundo IPCC, 2018

Cada modelo reúne, portanto, um conjunto de tecnologias disponíveis, que ao serem combinadas podem levar ao resultado almejado. A trajetória P1 conta com uma descarbonização mais rápida da indústria e redução mais drástica no uso de combustíveis fósseis, que é representada por uma curva mais acentuada nos primeiros anos, e tem como meta 2050-2055 para atingir a neutralidade carbônica, isto é, o ponto em que o saldo entre as emissões e remoções de carbono da atmosfera seja nulo. Já na trajetória P4, a velocidade de redução das emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis e descarbonização do setor industrial e energético ocorrem mais lentamente, de forma que para atingir o orçamento de carbono em 2100, será necessário recorrer a emissões negativas, associadas ao uso de bioenergia com tecnologia de captura de carbono.

Um cenário climático, portanto, vai considerar uma trajetória para atender um determinado orçamento de carbono, e esta trajetória irá variar conforme as hipóteses de construção de cada tipo de modelo, e as opções de mitigação e descarbonização disponíveis para os setores carbono-intensivos, que podem variar conforme a viabilidade tanto técnica, quanto econômica. O uso combinado de diferentes tecnologias, bem como a velocidade e intensidade de sua aplicação, pode levar a resultados de emissões acumuladas semelhante, porém com trajetórias e custos distintos.

2.3.2. Modelos de avaliação integrada

Os modelos de avaliação integrada (IAMs) mapeiam as interações entre sistemas socioeconômicos e processos energéticos e ambientais e geralmente são utilizados para o desenvolvimento de cenários climáticos, estimando os custos e benefícios das políticas

de mitigação de emissões, e consequentemente os impactos econômicos das mudanças climáticas (ROCHEDO, 2016).

Ferramentas de modelagem aplicadas ao setor energético foram usadas no passado para lidar com o estudo do nexo e suas conexões com outros recursos e setores. SEMERTZIDIS (2015) argumenta, contudo, que ao mesmo tempo em elas cobrem aspectos do nexo, nenhuma das ferramentas delas é capaz de lidar holisticamente com todas as interligações entre recursos.

Os estudos de modelagem integrada focam em geral no nexo entre mitigação climática e área específicas de desenvolvimento como clima e poluição do ar, (LUDERER, VRONTISI, *et al.*, 2018) clima e segurança energética (IACOBUTA, HÖHNE, *et al.*, 2018, ROGELJ, POPP, *et al.*, 2018) e clima e acesso aos serviços de energia.

No mundo todo, há ainda poucos Centros de Pesquisas com enfoque de modelagem integrada. No Brasil, destaca-se o modelo de avaliação integrada BLUES (*Brazilian Land-use and Energy System*), desenvolvido na plataforma MESSAGE-Brazil (MSB) desenvolvido por KÖBERLE (2018) e ROCHEDO (2016).

2.3.3. Modelo BLUES

O Modelo BLUES (*Brazilian Land-use and Energy System)*, que será utilizado neste estudo é um modelo de otimização, que entrega as soluções mais custo-efetivas, de acordo com as hipóteses assumidas, minimizando os custos das ações dos agentes econômicos.

O BLUES é um modelo otimização intertemporal[9] desenvolvido por KÖBERLE (2018) com o objetivo estudar as interações entre mitigação de mudanças climática, implementação de bioenergia e mudanças de uso do solo no Brasil até 2050. Sua construção se deu a partir da adição de um módulo de uso do solo e agricultura ao modelo de sistemas energéticos já existente da plataforma de geração de modelo MESSAGE *(Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental*

[9] Modelos de otimização intertemporal (do inglês *perfect foresight*) otimizam com base em todo o horizonte de análise e não a cada período separadamente. Para maiores detalhes sobre a concepção do modelo, ver Rochedo (2018) e Köberle (2018)

Impacts) através de uma conexão tipo *hard-link* entre os setores energético e de uso do solo (KÖBERLE, 2018, ROCHEDO, 2016).

O modelo é desenhado para simular a competição entre tecnologias e fontes energéticas para atender a demanda por serviços ambientais, que são exógenos ao modelo, com o objetivo final de otimizar o custo total do sistema. Para chegar à solução mais custo-efetiva, o modelo dispõe de diferentes opções de tecnologias para atender aos diversos serviços energéticos, tem que atender a uma série de restrições, que constituem as condições de contorno do problema. As restrições dizem respeito, por exemplo, a limites para investimentos, disponibilidade e preço de combustíveis, regulamentações ambientais, taxa de penetração de mercado para novas tecnologias, entre outras (ROCHEDO *et al.*, 2018).

Na concepção do modelo são construídos os fluxos de energia, de acordo com cada nível energia primária, secundária, final e auxiliar, abrangendo todas as etapas desde o recurso energético até seu uso final. Cada processo de conversão envolvendo um fluxo energético, ocorre a partir de uma tecnologia associada, para qual estão especificados os parâmetros apropriados e restrições como capacidade instalada, fator de capacidade, eficiência, custos de operação e manutenção, restrições de expansão e etc. (ROCHEDO *et al.*, 2018).

O módulo de uso do solo considera 8 categorias de uso de solo: cultivo simples, cultivo duplo, floresta plantada, floresta, pasto degradado, pastagem recuperada, savana e sistema integrado. O modelo BLUES não é um modelo georreferenciado, contudo é constituído por 6 regiões que compreendem as 5 macroregiões brasileiras, Norte, nordeste, Centro-oeste, Sul e Sudeste e uma última região que integra todo o Brasil e apesar disso, leva em consideração as áreas disponíveis para cada região, excluindo as áreas de APPs e APAs[10], assim como áreas urbanas (KOBERLE, 2018). Portanto, o ano base, usa como referência dados oficiais do IBGE para estimativa dos usos do solo, e para a projeção de cenários são permitidas transições entre cada uma das categorias, conforme mostrado na Figura 16: Categorias de uso do solo no modelo BLUES (KOBERLE, 2018) de forma a atender as demandas de expansão do setor agrícola. A transição entre cada

[10] Áreas de Preservação Permanente (APP)

As Áreas de Preservação Permanente foram instituídas pelo Código Florestal (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) e consistem em espaços territoriais legalmente protegidos, ambientalmente frágeis e vulneráveis, podendo ser públicas ou privadas, urbanas ou rurais, cobertas ou não por vegetação nativa. (MMA, 2018)

uma dessas categorias tem um custo e uma emissão de GEE associada, de forma que a área total é sempre preservada, muda-se apenas a forma de uso do solo e as emissões associadas. Por ser um modelo de avaliação integrada entre o setor de energia e de uso do solo, ele é capaz de avaliar as interações entre escolhas tecnológicas que afetam tanto as emissões para o setor de energia, quanto o uso de solo, escolhendo a opção mais custo efetiva.

Figura 16: Categorias de uso do solo no modelo BLUES (KOBERLE, 2018)

Fonte: ANGELKORTE, 2019

O modelo é capaz de produzir análises entre 2010 e 2050, com um passo de 5 anos de forma a minimizar o custo total do sistema e atender a um orçamento de carbono, atribuído ao cenário climático avaliado (KOBERLE, 2018). Os cenários climáticos são determinados conforme a análise que se deseja conduzir, comparando diferentes níveis de aquecimento global, que por sua vez estão associados a orçamentos de carbono específicos. Cada uma das escolhas tecnológicas tanto no setor de uso do solo, quanto de energia, tem um custo e emissão associado, de forma que o modelo otimiza de maneira global para escolher a combinação mais custo-efetiva. É possível, também testar incluir as hipóteses assumidas para as trajetórias socio-econômicas, alterando inputs exógenos do modelo como crescimento populacional, e adaptar outras hipótese sobre o crescimento da demanda por energia e outros recursos, de forma a refletir uma trajetória consistente com as pré-estabelecidas pelo IPCC.

3. Capítulo 3 - Metodologia para Incorporação do Modelo Paramétrico

Neste capítulo será apresentada a metodologia para a construção do modelo paramétrico, bem como o estudo de caso utilizado para validar e obter resultados a partir do modelo proposto.

3.1. Etapas Metodológicas

A análise proposta neste estudo visa incorporar a perspectiva do uso de recursos hídricos na avaliação integrada de cenários climáticos através da criação de um modelo técnico paramétrico capaz de calcular e localizar as demandas de água a partir das projeções do modelo de avaliação integrada BLUES (ANGELKORTE, 2019, KÖBERLE, 2018). Este capítulo, portanto, descreve o método utilizado na elaboração do modelo para quantificação do uso de água para os setores de uso do solo, energia, indústria e abastecimento humano e animal, bem como as premissas e considerações adotadas para a alocação espacial das demandas.

Os setores estudados e as respectivas finalidades do uso consuntivo de água que serão retratadas neste estudo, estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 3:Setores estudados e as respectivas finalidades do uso de água

Setor	Uso de água
Agricultura	Água para irrigação
Pecuária	Água para Abastecimento Animal
Energia	Água para produção de energia
Indústria	Água para Indústria
Abastecimento Humano	Água para abastecimento rural e urbano

Fonte: Elaboração própria

A metodologia proposta é dividida em cinco grandes etapas. As três primeiras etapas metodológicas visam construir as bases para criação do modelo em si. Em uma etapa posterior, a modelagem será validada a partir da comparação dos resultados para os anos de 2010 e 2015 com valores de referência da ANA. Finalmente, o modelo é utilizado para fornecer análises no âmbito do nexo clima-água-energia e uso do solo com base em um estudo de caso dos autores ROCHEDO *et al.* (2018). A escolha deste caso buscou trazer uma discussão já existente baseada nos resultados do modelo BLUES associada ao estresse entre energia e uso do solo, em que não é abordada a questão de recursos hídricos. Na Figura 17 pode ser visto um resumo das principais etapas propostas para o estudo.

Etapa 1: Construção de Coeficientes Técnicos com base no nível de detalhamento do Modelo BLUES para Retirada, Consumo e Retorno de água

Etapa 2: Proposta para Quantificação do Uso de água para setor de uso do solo, energia, indústria, abastecimento urbano e rural e abastecimento animal.

Etapa 3: Agregação e proposição de critérios e parâmetros para distribuição espacial da demanda nas bacias de contribuição.

Etapa 4: Validação do Modelo Paramétrico a partir da comparação com ANA(2017)

Etapa 5: Estudo de Caso com base em ROCHEDO *et al.*(2018) (Modelo BLUES)

Figura 17: Etapas para Construção, Validação e Teste do Modelo Técnico Paramétrico

A metodologia proposta neste trabalho é uma análise do tipo *top-down*, em que os resultados gerados por um IAM, neste caso o modelo BLUES, servirão como dados de entrada para a etapa de quantificação da retirada e consumo de água para diferentes cenários climáticos e posteriores análises sob a ótica do nexo água-energia-uso do solo. Portanto, é importante ressaltar que variações na oferta ou restrições hídricas não são consideradas ao calcular a expansão dos setores de uso de solo ou energia. O modelo técnico paramétrico se propõe a calcular as demandas, a partir de expansões projetadas, de maneira a indicar possíveis situações em que haja maior pressão sobre os recursos hídricos.

A Figura 18 ilustra os principais fluxos de informação e conexão entre o modelo BLUES e o modelo paramétrico aqui desenvolvido. O modelo BLUES gera como

resultado dados apenas para os setores de uso do solo e energia. Para o cálculo dos outros setores, como população e indústria são utilizados os mesmos *inputs* que são alimentados no BLUES para se manter a consistência dos cenários avaliados.

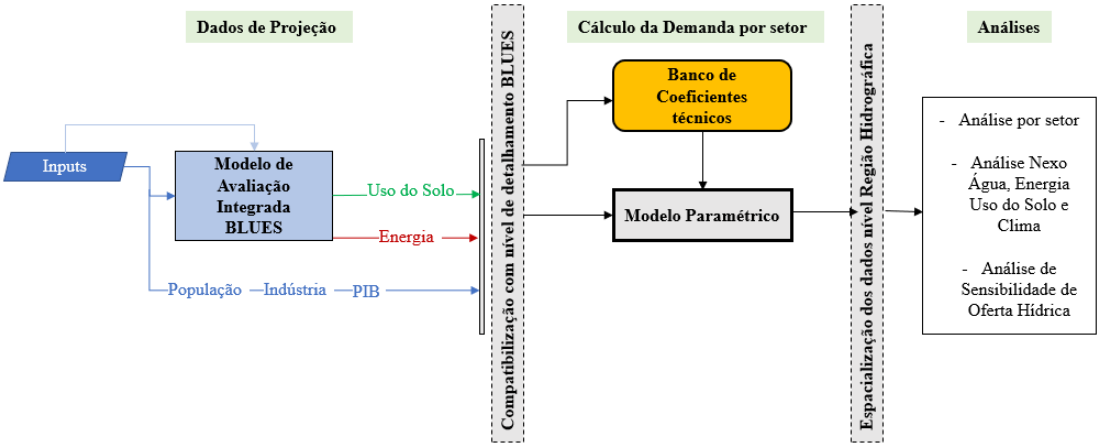


Figura 18:Fluxograma das interações entre o Modelo BLUES e do Modelo Paramétrico

Os resultados e discussões do estudo de caso serão apresentados a partir de uma análise setorial e da perspectiva do nexo *CLEW*. Além da análise da projeção da demanda por setor, calculado a partir dos cenários de projeção para o setor energético e uso do solo, será realizada uma análise em relação a oferta a partir do cálculo do balanço hídrico quantitativo. Nesse caso, será considerado que a disponibilidade hídrica atual se perpetua durante o período avaliado, abordagem usualmente adotada por estudos de modelos de avaliação integrada na literatura. Portanto, possíveis impactos positivos ou negativos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica também não foram considerados neste estudo.

O balanço entre oferta e demanda possível de se obter a partir dessa análise é apenas um resultado indicativo e tendencial, uma vez que não considera restrições de disponibilidade hídrica do lado da oferta, que poderiam causar um deslocamento espacial ou alteração da demanda.

3.2. Construção do Modelo Paramétrico

O cálculo proposto para a quantificação do uso de água é feito de maneira exógena ao modelo BLUES, de tal modo que a limitação de recursos hídricos não é levada em consideração na função objetivo e nas escolhas tecnológicas do modelo de avaliação integrada. Contudo, a contabilização feita dessa forma permite propor critérios para disposição espacial nas bacias de contribuição e avaliar a viabilidade das soluções encontradas sob a perspectiva dos recursos hídricos.

A construção do modelo técnico-paramétrico dependeu das três primeiras etapas metodológicas apresentadas anteriormente:

i) elaboração de coeficientes técnicos para quantificação da retirada, retorno e consumo para cada um dos setores, no nível de detalhamento proposto;

ii) obtenção de dados para projeção das demandas dos usuários consuntivos;

iii) espacialização do uso conforme critérios pré-determinados.

O uso de água neste trabalho é caracterizado pela retirada, consumo e retorno, conforme os conceitos definidos anteriormente. A metodologia para a determinação da demanda de baseia no cálculo indireto através do uso de coeficiente técnicos, de forma análoga à metodologia aplicada pela ANA na determinação do uso de água dos relatórios de conjuntura de recursos hídricos. Os dados de coeficientes hídricos foram elaborados com base em uma extensa pesquisa na literatura para os cinco setores estudados: uso do solo, pecuária, energia, indústria, e abastecimento humano (urbano e rural), de forma a serem compatíveis com as informações disponíveis. As premissas utilizadas no cálculo da quantidade de água retirada e consumo para cada setor será descrita mais detalhadamente a seguir.

Na segunda etapa, a maior parte dos dados para projeção é originada do modelo de avaliação integrada (BLUES), que está sendo utilizado nesse estudo, ou então de dados que também serviram de subsídios para as rodadas do modelo. O nível de detalhamento e tipo das informações fornecidas pelo modelo integrado que foram usadas como entrada para o cálculo das demandas pode ser visto na Tabela 4. A abrangência das informações é dada no nível das macrorregiões, Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste, com exceção do refino de derivados de petróleo, em que o dado é fornecido para o Brasil.

Tabela 4: Dados de entrada fornecidos pelo Modelo BLUES

Setor	Detalhamento	Unidade	Abrangência
Energia	Geração de energia primária por tecnologia	GJ/ano	Macrorregião (*exceto para refino*)
	Geração energia secundária por tecnologia	GJ/ano	Macrorregião
Uso do Solo	Área plantada por cultura	kha/ano	Macrorregião
Pecuária/ Abastecimento Animal	Produção de carne	kt/ano	Macrorregião
	Produção de leite	kt/ano	
	Produção de frango	kt/ano	

Fonte: Elaboração própria

A terceira etapa teve como objetivo desagregar os resultados do modelo de maneira a possibilitar uma melhor comparação sob a perspectiva de recursos hídricos. Apesar de não ser um modelo georreferenciado, o módulo de uso do solo do BLUES leva em consideração bases georreferenciadas para mapear a área existente dos seis biomas brasileiros, bem como a existência de áreas protegidas e manchas urbanas no cálculo da área disponível para mudanças de uso do solo[11]. A espacialização desses resultados de maneira exógena pode indicar quais regiões possuem maior probabilidade de estarem em situações de estresse hídrico. A adequação entre as macrorregiões políticas e as fronteiras entre as regiões hidrográficas é importante neste sentido também, uma vez que a unidade básica de gestão é a bacia hidrográfica.

Para este estudo, a espacialização foi feita em duas etapas. Primeiramente, os dados fornecidos pelo BLUES de abrangência macrorregional foram desagregados para o nível regional, por unidade federativa, a partir do uso de bases de dados georreferenciadas como suporte para elaboração de critérios e subsídios para premissas da localização da expansão das demandas. É importante ressaltar que a proporção entre cada uma das macrorregiões do Brasil é um dado fornecido a partir da projeção do modelo BLUES, sendo possível alocar as demandas entre os estados de acordo com os critérios específicos para cada setor conforme será explicado a seguir. Em seguida, foi realizado o cálculo das vazões de água utilizando os coeficientes técnicos propostos, e, posteriormente essas vazões foram

[11] Para mais detalhes da construção do módulo de uso do solo ver a tese de KÖBERLE (2018)

alocadas nas 12 bacias hidrográficas brasileiras com base nas informações de outorgas federais e estaduais de direito de uso de água.

Foi elaborada uma matriz para cada setor estudado, para determinar a proporção de uso de água por bacia para cada estado. Adotou-se a premissa de que a proporção observada nas outorgas que determina a vazão demandada em cada bacia é mantida ao longo do período estudado. Para determinação das contribuições de cada estado por região hidrográfica foram analisadas 95.456 outorgas, sendo 30.033 outorgas federais, emitidas pela Agência Nacional de Águas e as outras 65.423 restantes emitidas regionalmente por diferentes órgãos ambientais estaduais. Há uma significativa diferença no nível de detalhamento dos dados fornecidos pela ANA e os dados disponíveis das outorgas estaduais. A base de dados das outorgas federais mantém uma atualização constante, e as informações das outorgas federais parte de um esforço feito para os relatórios periódicos de Conjuntura de Recursos Hídricos de consolidação das informações provenientes dos diferentes órgãos estaduais.

Dessa forma, foi utilizado o compilado das outorgas vigentes até 2016 disponível como arquivo *shapefile*[12] na base de metadados da ANA, elaborado para o último relatório da Conjuntura (ANA, 2017a). As outorgas federais possuem especificado tanto o corpo hídrico, de onde foi outorgada, quanto a Região Hidrográfica, enquanto nas outorgas estaduais não há a informação da região geográfica, apenas do corpo hídrico. Portanto, para determinar qual a região pertencente, foi utilizado o *software* QGIS[13] para identificar as feições referentes às outorgas estaduais em cada uma das regiões hidrográficas. As duas bases de dados foram unidas mantendo as informações de validade, vazão, UF, finalidade e nome do usuário. Para se manter a consistência, foram usadas foi aplicado um filtro para selecionar apenas as outorgas vigentes até julho de 2017 para manter a consistência das análises.

Para os casos em que não havia informações disponíveis de outorgas para o estado, ou ausência e/ou inconsistência de informações, foi adotada a distribuição percentual da área superficial das regiões hidrográficas por estado, no lugar da alocação das vazões

[12] Tipo de arquivo que contém informações geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas.

[13] QGIS é um software livre de Sistema de Informações Geográficas, que permite edição e análise de dados georreferenciados

segundo a outorga, conforme explicitado na Tabela 5. As premissas específicas para cada setor serão apresentadas e explicadas na próxima seção.

Tabela 5: Distribuição da área superficial das Regiões Hidrográficas por Estado

	RO	AC	AM	RR	PA	AP	TO	MA	PI	CE	RN	PB	PE	AL	SE	BA	MS	MT	GO	DF	MG	ES	RJ	SP	PR	SC	RS
AMZ	0,05	0,03	0,35	0,05	0,28	0,03												0,20									
TOC					0,21		0,34	0,04										0,14	0,27	0,00							
AOC					0,09			0,89																			
PRB								0,20	0,76	0,05																	
AOR									0,01	0,46	0,19	0,20	0,10	0,05													
SFO													0,11	0,02	0,01	0,48			0,01	0,00	0,37						
ALT															0,04	0,69					0,26	0,01					
ASE																					0,45	0,16	0,19	0,18	0,03		
PRG																	0,48	0,52									
PRN																	0,19		0,16	0,00	0,18			0,24	0,21	0,01	
URU																										0,27	0,73
ASU																								0,01	0,03	0,20	0,76

Fonte: Elaboração própria baseado em (ANA, 2013b, 2015b, MMA, 2006c, b, d, h, f, a, e, g, j)

Legenda:

AMZ – Região Hidrográfica da Amazônia
AOC – Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Ociental
TOC – Região Hidrográfica do Tocantins Araguaia
AOR – Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental
PRB – Região Hidrográfica do Parnaíba
SFO – Região Hidrográfica do São Francisco
ALT – Região Hidrográfica Atlântico Leste
ASE – Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste
PRG – Região Hidrográfica Paraguai
PRN – Região Hidrográfica Paraná
URU – Região Hidrográfica Uruguai
ASU – Região Hidrográfica Atlântico Sul

RO – Rondônia; AC – Acre; AM – Amazonas; RR – Roraima; PA – Pará; TO – Tocantins; MA – Maranhão; PI – Piauí; CE – Ceará; AL- Alagoas; SE – Sergipe; BA – Bahia; MS – Mato Grosso do Sul; GO – Goiás – DF – Distrito Federal; MG – Minas Gerais; ES – Espírito Santo; RJ – Rio de Janeiro; SP – São Paulo; PR – Paraná; SC – Santa Catarina; RS- Rio Grande do Sul.

Na Tabela 6 é apresentado um resumo das principais fontes de informação e referências utilizadas para proposição da metodologia em cada uma das três etapas citadas. Todas serão descritas com maior detalhe a seguir para cada um dos setores, seguindo esta mesma lógica metodológica.

Tabela 6: Principais fontes de Informações para construção do modelo paramétrico

Setor	Coeficientes Técnicos	Projeção de Uso	Espacialização dos Resultados
Uso do Solo	FUNARBE (2010)	Dados do Modelo BLUES	ANA (2020) IBGE (2019) IBGE (2009) ANA (2017c) FAO (2017)
Energia	Vasquez-Arroyo (2018) Banco de Dados de Coeficientes Hídricos (Revisão da Literatura);	Dados do Modelo BLUES	ANA (2020) ANEEL (2020) EPE (2020) ANA (2020b)
Indústria	FUNARBE (2010) USSAMI (2014) IBGE (2009)	(MCTIC, 2017)	ANA (2020) IBGE (2009) ANA (2017b)
Abastecimento Urbano	ONS (2015) SNIS (2010;2015) ANA, 2019 BRASIL (2018)	BLUES – (SSP 2) IBGE, 2018 UN, 2019	IBGE (2018) ANA (2020)
Abastecimento Animal	ANA, 2019 ONS,2005 IBGE(2019b, 2020)	Dados do Modelo BLUES	ANA (2020) IBGE(2019b, 2020)

3.2.1. Quantificação do uso de água para irrigação

A escolha das culturas irrigadas estudadas partiu das categorias existentes nas análises do modelo BLUES e buscou ter uma representação abrangente dos cultivos agrícolas no país, considerando como critério a intensidade de irrigação e a relevância para análise do nexo água-energia- uso do solo. De modo que as culturas que possuem finalidade simultânea tanto para alimentação quanto para uso energético, bem como alta demanda de irrigação como cana-de-açúcar e soja foram centrais para as análises realizadas.

O modelo BLUES divide as culturas nas categorias representadas na Tabela 7. Para se ter uma representação compreensiva dos cultivos no Brasil, as culturas agrícolas selecionadas como as mais representativas da categoria podem ser vistas também na Tabela 7. A seleção descrita na tabela abaixo também está consistente com a realizada pelo estudo da FAO (2017), que selecionou as culturas prioritárias para cenários atuais e futuros para agricultura irrigada no Brasil, baseando-se nos critérios de maior ocupação de área atual, maiores volumes de produção e maiores valores monetários gerados.

Tabela 7: Equivalência da Lista de Culturas estudadas e categorias do modelo BLUES

Lista de Culturas Estudadas	**BLUES**
Algodão	Fibras *(fiber)*
Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar *(Sugarcane)*
Mandioca	Raízes *(roots)*
Arroz	Arroz (*rice)*
Feijão	Leguminosas (*Pulses)*
Milho	Milho (*maize)*
Laranja	Frutas (*fruits)*
Capim-elefante	Gramíneas / Forrageiras (*Grassy)*
Soja	Soja (*soy)*
Café	Café (*coffee)*
Trigo	Trigo (*wheat)*
Eucalipto e Pinus	Madeira (*Woody)*

Fonte: Elaboração própria

Nos casos do algodão e feijão, por exemplo, que se encaixam em uma categoria mais abrangente (respectivamente fibras e leguminosas), essas culturas foram escolhidas, pois são as mais representativas em termos de área plantada e as principais culturas irrigadas, de maneira similar ao feito por (ANGELKORTE, 2019). Para cultivo de frutas foi considerada apenas a laranja pois espera-se que haja uma expansão significativa desta cultura baseada na agricultura irrigada (FAO, 2017). É importante fazer a ressalva de que, para este estudo, as espécies de eucalipto e pinus foram consideradas como não havendo necessidade de irrigação direta. Essa hipótese é diferente de afirmar que não há uso de água, contudo para fins da análise realizada aqui apenas são considerados os casos em que há uso direto de água, desconsiderando a água proveniente da precipitação e uso de água subterrânea. Essa abordagem é consonante com a análise de uso de água para irrigação feita pela ANA. As culturas de cereais, oleaginosas e nozes não foram consideradas separadamente neste estudo, por entender que as culturas mais importantes para irrigação nessas categorias já estavam consideradas anteriormente.

3.2.1.1. Coeficientes Técnicos

A principal premissa adotada para o setor de uso do solo é que o uso direto de água na agricultura ocorre através da retirada e consumo de água para irrigação. Os usos indiretos como de precipitação e a retirada e/ou consumo de água subterrânea estão implícitos no cálculo dos coeficientes de irrigação utilizados, que determinam a quantidade de água para irrigação a partir de um balanço da necessidade hídrica de cada cultura, levando em consideração as diferentes condições edafoclimáticas existentes.

Na proposição dos coeficientes foi feita uma distinção entre retirada, consumo e retorno. O consumo representa a quantidade de água perdida por evapotranspiração da cultura somado as perdas típicas de cada sistema de irrigação, levando em consideração as condições edafoclimáticas de cada região e necessidades hídricas de cada cultura. Tal premissa foi incorporada através da distinção entre os coeficientes específicos para cada cultivo a nível regional. Para este estudo foram adotados coeficientes representativos de uma média das tecnologias de irrigação de acordo com o padrão histórico. (ANGELKORTE, 2019) propôs uma metodologia para aprimorar as opções tecnológicas para o modelo BLUES, em que há distinção entre tecnologias de alta e baixa produtividade e seus respectivos usos de água e outros insumos. Contudo, a versão utilizada para o teste do modelo é uma versão anterior a esta, e, portanto, não estarão incorporadas estas considerações.

Os coeficientes técnicos utilizados são baseados na Matriz de Coeficiente Técnicos elaborados pelo estudo da FUNARBE (2011). Foi feito um rigoroso trabalho de levantamento em nível municipal obtidos em função do balanço hídrico das áreas irrigadas, dos aspectos específicos da cultura agrícola e do tipo de irrigação e das condições de manejo aplicadas (FUNARBE, 2011). Para adequar o nível de detalhamento dos coeficientes ao nível de detalhamento fornecido pelo modelo, os coeficientes municipais foram agrupados por estado, propondo um coeficiente médio por estado para cada uma das culturas selecionadas neste estudo. Além da adequação regional, foi necessária também uma conversão de unidades para fins de comparação das demandas de saída por setor. Portanto, a unidade informada na matriz original da FUNARBE (2011) era em litros/hectare/segundo, e a informação de saída do modelo paramétrico será em Mm^3/ano.

A distinção de coeficientes de irrigação no nível regional é importante, pois cada configuração espacial das culturas leva a uma situação específica de necessidade hídrica. A cana-de-açúcar, por exemplo, possui um coeficiente de irrigação baixíssimo no Sul, enquanto no Nordeste pode chegar a um valor cerca de 10 vezes maior.

Outro ponto crucial é a determinação da área irrigada efetiva. A necessidade de irrigação varia conforme o tipo de cultura e as condições climáticas de cada região e estado. Portanto, para se identificar a área irrigada efetiva em cada região foram utilizados os percentuais de irrigação apresentados na Tabela 8. Os percentuais de área irrigada foram calculados com base nos dados nos dados reais do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006). O cálculo da área irrigada efetiva (AE) pode ser visto abaixo, em que AP representa a área plantada.

$$AE = (P_{irr}) * AP \quad \text{Equação 1}$$

$$Q_R = AE * Coef_{irr_R} \quad \text{Equação 2}$$

$$Q_c = AE * Coef_{irr_C} \quad \text{Equação 3}$$

AE: área irrigada efetiva

P_{irr}: percentual de área irrigada

Q_R: vazão de água retirada (m^3/s)

Q_C : vazão de água consumida (m^3/s)

$Coef_{irrR}$: coeficiente de irrigação para retirada (m³/ha.s)

$Coef_{irrC}$: coeficiente de irrigação para consumo (m³/ha.s)

Tabela 8: Percentual de Irrigação por estado

(%)	Algodão	Arroz	Café	Cana-de-açúcar	Capim Elefante	Feijão	Mandioca	Milho	Soja	Trigo
RO	0	2	5	4	1	3	8	3	2	0
AC	0	1	5	2	1	1	1	1	0	0
AM	0	1	5	0	1	1	1	0	0	0
RR	0	72	5	9	1	0	0	5	0	0
PA	0	1	5	89	1	2	2	3	6	0
AP	0	46	5	8	1	2	3	2	0	0
TO	0	27	5	85	1	8	1	3	8	0
MA	0	2	20	82	1	2	2	2	3	0
PI	0	11	20	9	1	2	2	2	0	0
CE	2	38	20	34	1	6	2	3	93	0
RN	13	62	20	89	1	6	5	5	11	19
PB	9	29	20	63	1	3	3	4	0	0
PE	1	82	20	58	1	5	4	4	0	0
AL	1	84	20	69	1	1	1	1	0	0
SE	0	90	20	45	1	2	2	2	0	0
BA	9	22	20	48	1	4	3	5	6	0
MG	17	30	20	49	1	30	4	10	14	78
ES	0	34	20	33	1	21	2	17	0	0
RJ	0	55	20	37	1	21	13	16	0	0
SP	42	66	20	16	1	50	4	18	14	51
PR	2	57	5	13	1	2	2	2	5	2
SC	0	88	5	3	1	3	2	2	2	1
RS	0	98	5	1	1	4	1	3	4	3
MS	1	81	25	49	1	10	1	4	3	2
MT	5	2	25	11	1	31	2	4	3	0
GO	14	20	25	56	1	56	3	8	5	90
DF	0	75	25	26	1	40	28	28	4	100

Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2006) e ANGELKORTE (2019)

3.2.1.2. Expansão da demanda de água para irrigação

ANA (2017c) fez uma projeção tendencial para expansão da agricultura irrigada entre 2015 até 2030 e calculou a potencial área efetiva para expansão da agricultura irrigada para cana-de-açúcar, arroz inundado e demais culturas. O potencial efetivo

considera apenas as áreas com aptidão de solos alta ou média, aptidão de relevo alta, qualidade logística alta (existência de escoamento da produção e de energia elétrica) e exclui outras áreas de proteção ambiental e privilegiam as classes territoriais que indicam maior potencial para expansão da irrigação remetendo à presença de infraestrutura, serviços de apoio, tecnologia, assistência técnica etc. No potencial de expansão efetivo visto na Figura 19 são consideradas apenas as áreas adicionais.

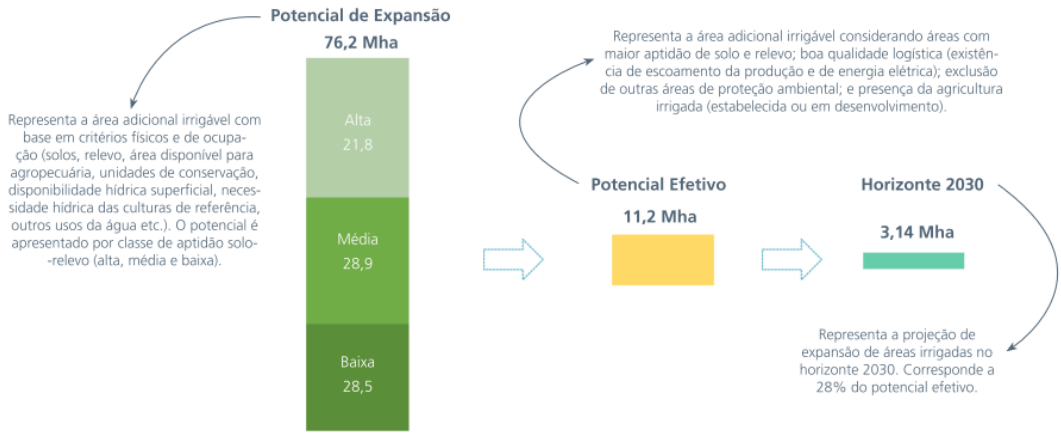


Figura 19: Expansão da área irrigada segundo ANA (2017c)

FAO (2017) identificou áreas prioritárias para expansão da agricultura sustentável de acordo com critérios ambientais, disponibilidade hídrica, condições técnicas e de aptidão do solo e de infraestrutura. O estudo selecionou uma área total de bacias de 27.472.537 ha para o estudo de áreas potenciais para fomento da agricultura irrigada sustentável, concluindo que apenas 12.387.518 ha estão efetivamente disponíveis (FAO, 2017).

Para a determinação das áreas possíveis para expansão da agricultura das demais culturas, de maneira a localizar a demanda de água para irrigação, ambas informações foram usadas. FAO (2017) não selecionou bacias, por exemplo nos estados CE, RN, PB, PE e AP, de acordo com seus critérios de exclusão de áreas prioritárias. Por outro lado, por vezes a área calculada por FAO (2017) em que poderia haver uma expansão da agricultura irrigada era maior do que a reportada em ANA (2017c). Portanto, como o período analisado nos cenários vai até 2050 e as projeções no estudo eram apenas até

2030, foi considerada a maior área de expansão para cada estado entre os dois estudos, excluindo-se a área para cana-de-açúcar e de arroz inundado.

O estudo de FAO (2017) aponta apenas as áreas para irrigação por estado e não por bacia, nem por cultura. Portanto, para se distribuir a localização dos cultivos, a alocação foi feita de acordo com o Censo Agropecuário de 2017 do IBGE com base nos valores de área plantada para cada uma das culturas estudadas, de forma que, os estados que possuem maior extensão de uma determinada cultura e maior produtividade serão priorizados proporcionalmente na expansão em relação aos outros estados, de maneira análoga à hipótese adotada anteriormente.

Apesar de considerar a produtividade na espacialização dos estados, essa lógica só é aplicada para estados na mesma região, em que, em geral, há uma menor variação na produtividade, do que entre estados em diferentes regiões. Contudo, é importante notar que as projeções de expansão das áreas cultivadas provenientes do modelo BLUES estão desagregados no nível de macrorregião, de forma que os critérios propostos foram levados em consideração para a alocação das demandas de cada região entre seus estados. O trabalho realizado ANGELKORTE (2019) posteriormente incorporou o critério de produtividade para dentro do modelo, em que cada produtividade (baixa, média ou alta) tem um custo, associado a um conjunto de tecnologias de irrigação, uso de fertilizantes e outros insumos. Dessa forma, o modelo de otimização inclui essa variável na sua função objetivo, no momento de alocação das culturas em cada região.

3.2.1.1. Espacialização da Demanda

No modelo BLUES, a alocação das culturas é feita com base em critérios de minimização de custo, levando em consideração as restrições de áreas disponíveis no modelo para cada uma das macrorregiões. O critério para alocação entre os estados de cada macrorregião foi feito de acordo com base nos valores históricos observados para área colhida em cada estado e a produtividade de cada cultura em cada estado. Na Figura 20 podem ser vistas as etapas metodológicas aplicadas para localização espacial das demandas.

Para os valores das séries de 2010 a 2015, é utilizada uma matriz para distribuição de área colhida com base nos dados do Censo Agropecuário de 2006 e nos dados de produtividade histórica no período entre 1980 e 2017. A matriz representa a distribuição proporcional entre os estados de cada macrorregião em termos de área colhida para cada

uma das culturas estudadas multiplicadas pelas respectivas produtividades médias históricas, de maneira que, um estado, no qual há maior produtividade de determinada cultura, terá prioridade na alocação.

Dessa forma, são adotados dois critérios, um que sugere que a disposição entre os diferentes estados de uma região tem base na área proporcional e é a mesma para os anos que já passaram. E o segundo que considera a produtividade, de maneira a induzir uma distribuição com maior aproveitamento da terra. Ao usar as proporções das áreas colhidas por estado, a hipótese principal é de que, se um estado possui uma maior área plantada para determinada cultura, significa que ele possui maior aptidão ou probabilidade de continuar tendo proporcionalmente maior área daquela cultura. Contudo, extensas áreas não necessariamente implicam em uma alta produção, em regiões em que o solo não é adequado ou as condições climáticas não são favoráveis, com baixa precipitação etc., pode ser necessária a plantação de grandes áreas de maneira ineficiente. Para evitar esse tipo de escolha portanto, foi utilizado o critério adicional da produtividade. Todavia, é importante lembrar que a alocação entre as macrorregiões é feita pelo modelo integrado, valendo este critério apenas para a disposição entre os estados de cada região.

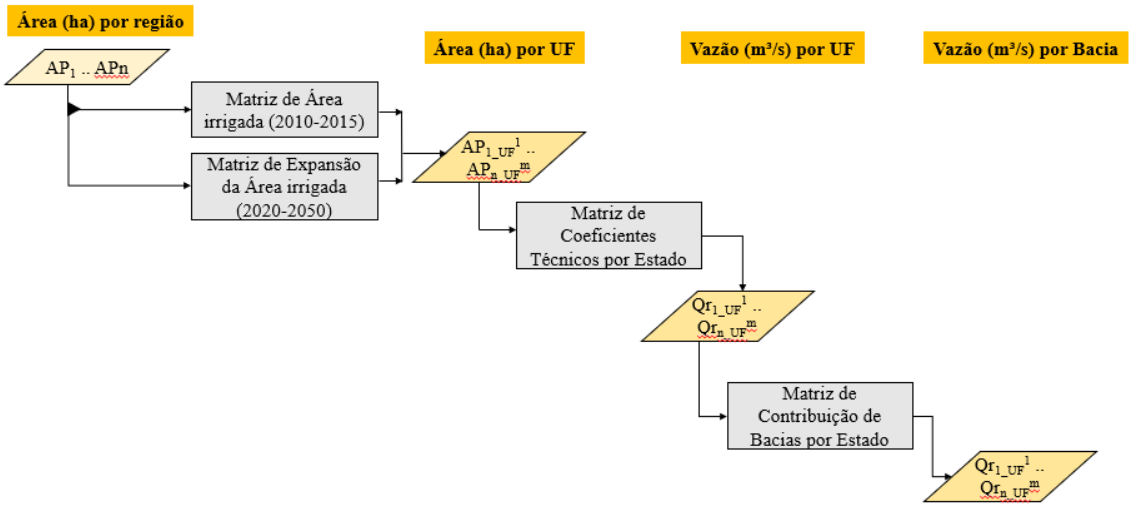


Figura 20: Metodologia para espacialização das demandas para irrigação no modelo paramétrico

Para os anos subsequentes de 2020 a 2050 foi utilizada uma segunda matriz, que contém o total das áreas irrigadas, segundo as bases de referência histórica somadas às áreas de expansão da agricultura irrigada, segundo o proposto pelo estudo “Agricultura irrigada sustentável no Brasil: identificação de áreas prioritárias” para todas as culturas,

exceto para cana-de-açúcar e arroz inundado, em que foi utilizado o valor de área de expansão do Atlas da Irrigação da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017c). Nesse documento as áreas irrigadas estão desagregadas por município, mas há distinção apenas para o cultivo de arroz inundado e para cana-de-açúcar. A alocação das áreas irrigadas para outras culturas foi feita com base no Censo Agropecuário do IBGE, 2017, de maneira a localizar espacialmente cada uma das culturas a nível estadual. Aqui de maneira similar ao feito anteriormente também foi usado o critério de produtividade para priorizar a ocupação dos estados em que há maior produtividade, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9: Média da produtividade histórica (kt/ha área colhida) para culturas selecionadas por estado entre 1980 e 2017)

(kt/ha)	**Arroz**	**Café**	**Cana-de-açúcar**
RO	0,10	0,06	0,14
AC	0,08	0,08	0,08
AM	0,09	0,04	0,14
RR	0,26	0,62	0,06
PA	0,25	0,06	0,25
AP	0,08	0,08	0,11
TO	0,15	0,06	0,23
MA	0,08	0,04	0,12
PI	0,07	0,03	0,11
CE	0,11	0,04	0,09
RS	0,08	0,02	0,11
PB	0,07	0,19	0,10
PE	0,17	0,05	0,12
AL	0,19	0,08	0,13
SE	0,18	0,05	0,12
BA	0,05	0,50	0,10
MG	0,24	0,16	0,34
ES	0,23	0,11	0,31
RJ	0,37	0,72	0,26
SP	0,16	0,01	0,09
PR	0,25	0,32	0,44
SC	0,29	0,28	0,39
RS	0,46	0,40	0,17
MS	0,46	0,64	0,16

MT	0,23	0,12	0,28
GO	0,19	0,08	0,30
DF	0,13	0,15	0,26

Fonte: Elaboração própria baseado em SIDRA IBGE (1980, 1985, 1995, 2006,2017)

A obtenção da vazão de água para irrigação foi alcançada através da multiplicação das áreas irrigadas efetivas pelo coeficiente técnico de irrigação para cada estado, conforme a equação abaixo:

$$Qr_{UF_1} = AE_1 * Coef_{R_{1_{UF1}}} + AE_2 * Coef_{R_{2_{UF1}}} + \cdots + AE_n * Coef_{R_{n_{UF1}}} \quad \text{Equação 4}$$

$$Qr_{UF_m} = AE_1 * Coef_{R_{1_{UFm}}} + AE_2 * Coef_{R_{2_{UFm}}} + \cdots + AE_n * Coef_{R_{n_{UFm}}} \quad \text{Equação 5}$$

$$Qc_{UF1} = AE_1 * Coef_{C_{1_{UF1}}} + AE_2 * Coef_{C_{2_{UF1}}} + \cdots + AE_n * Coef_{C_{n_{UF1}}} \quad \text{Equação 6}$$

...

$$Qc_{UFm} = AE_1 * Coef_{C_{1_{UFm}}} + AE_2 * Coef_{C_{2_{UFm}}} + \cdots + AE_n * Coef_{C_{n_{UFm}}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

Q_R: vazão de água retirada (m³/s)

Q_C : vazão de água consumida (m³/s)

AE: área irrigada efetiva (m³/s)

O retorno pode ser obtido pela diferença entre as vazões de retirada e de consumo como mostra a Equação 8. O balanço hídrico não leva em consideração questões temporais, uma vez que o tempo decorrido entre a retirada de água para irrigação, seu consumo e o retorno da água para o corpo d'água não ocorrem instantaneamente e não necessariamente ocorrem na mesma bacia que ocorreu a captação. Contudo, como o modelo é focado na determinação da demanda, é feita a hipótese de que a oferta é considerada constante, portanto, o retorno não altera diretamente a demanda.

$$Qretorno\ (Q_E) = Qretirada\ (Q_R) - Qconsumo\ (Q_C) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

Q_E = Vazão de retorno (m³/s)

Q_R = Vazão de retirada (m³/s)

Q_C = Vazão de consumo (m^3/s)

3.2.2. Quantificação do uso de água para o setor energia

A quantificação do uso de água para o setor de energia engendrou um maior esforço neste trabalho, dado o nível de detalhamento requerido para cada uma das opções de mitigação tecnológica nesse setor. A escolha da tecnologia energética, conforme mostrado na literatura, possui implicações sobre o uso de água (FRICKO *et al.*, 2016b, VÁSQUEZ-ARROYO, 2018, WALLIS *et al.*, 2014). Portanto, neste estudo, propôs-se estudar com detalhe cada uma das tecnologias na Tabela 10 para geração de energia.

As tecnologias analisadas foram selecionadas de acordo com dois critérios: um primeiro, de relevância, levando em consideração o nível de maturidade e grau de penetração daquela tecnologia nos modelos IAM; e um segundo, de intensidade hídrica, selecionando aquelas tecnologias em que se sabe que há um uso significativo de água. Por exemplo, apesar das expectativas nas projeções de expansão da geração eólica, o consumo de água tanto para a geração *onshore* quanto *offshore* a partir dessa fonte, foi considerado insignificante e, portanto, não foi contabilizado. Há ainda outras tecnologias que podem se tornar relevantes e não foram consideradas.

Para fim deste estudo, as usinas hidrelétricas são consideradas como usuários não consuntivos, por esse motivo, tampouco se quantifica a retirada e consumo dos recursos hídricos deste setor. No último relatório de Conjuntura de Recursos Hídricos (ANA, 2019a), a ANA mostrou que água perdida por evaporação dos reservatórios de usinas hidrelétricas configuraria como o segundo maior usuário consuntivo, apenas depois da irrigação. Contudo, a maior parte dos reservatórios são para uso múltiplo tornando a tarefa de alocação da demanda de água de acordo com cada setor bastante complexa. Os reservatórios das usinas hidrelétricas, em sua maioria servem a outras finalidades que não apenas geração de energia, portanto, seria necessário mapear para reservatório e propor método para alocação para cada setor envolvido, o que não caberia no escopo deste trabalho. Como não há uma referência largamente aceita, optou-se por considerar, em linha com a metodologia apontada por ANA atualmente, que a geração de energia hidrelétricas não se configura como um usuário consuntivo

As tecnologias selecionadas para estudo são as descritas na Tabela 10[14]

[14] CCS – Captura e Armazenamento de Carbono (sigla do inglês – *Carbon Capture and Storage)*

Tabela 10

IGCC – Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada (sigla do inglês -*Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC*). Refere-se à combinação de duas tecnologias: a geração de eletricidade em ciclo combinado e a gaseificação de combustíveis sólidos ou líquidos.

CSP – Energia Heliotérmica (sigla do inglês – *Concentrated Solar Power)*

PV – Energia fotovoltaica (sigla do inglês – *Photovoltaic*)

BTL – Combustíveis líquidos a base de biomassa (sigla do inglês – *Biomass to Liquid*

Tabela 10: Lista das Tecnologias utilizadas para o setor de energia

Energia	Setor	Descrição da Tecnologia
Secundária	Eletricidade	Térmica Rankine diesel
Secundária	Eletricidade	Ciclo Combinado
Secundária	Eletricidade	Ciclo Combinado com CCS[13]
Secundária	Eletricidade	Térmica Rankine a carvão mineral
Secundária	Eletricidade	Térmica Rankine a carvão mineral com CCS
Secundária	Eletricidade	Carvão mineral para IGCC[13]
Secundária	Eletricidade	Carvão mineral para IGCC com CCS
Secundária	Eletricidade	Térmica Rankine a biomassa
Secundária	Eletricidade	Solar CSP[13]
Secundária	Eletricidade	Solar PV[13] Centralizada
Secundária	Eletricidade	Cogeração a Bagaço
Secundária	Biocomb	(Biodiesel) Transesterificação metanol
Secundária	Biocomb.	(Biodiesel) Transesterificação etanol
Secundária	Biocomb.	(Etanol) usina anexas antigas c/s CCS
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Usina anexas novas c/s CCS
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Usina Autônomas Antigas
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Destilação p/ Anidro
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Peneira Molecular p/ Anidro
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Etanol 2ª geração
Secundária	Biocomb.	(Etanol) Usina autônoma. c/ e s/ CCS
Secundária	Biocomb.	(Bioquerosene) Alcohol-to-Jet
Secundária	Biocomb.	(Bioquerosene) HEFA[13]
Secundária	Biocomb.	(Bioquerosene) BTL[13]
Secundária	Biocomb.	(Diesel Verde) Green diesel BTL[13]
Secundária	Biocomb.	(Diesel Verde) Green diesel BTL c/ CCS
Primária	Refino	Refinaria de derivado de petróleo
Primária	Gás	Extração Gás Natural (Shale)
Primária	Carvão	Extração de Carvão mineral
Primária	Petróleo	Extração de Petróleo *On shore*

Fonte: Elaboração própria

3.2.2.1. Coeficientes Técnicos

A etapa de elaboração de coeficientes teve maior esforço para o setor energia, pois foi estudada uma gama de tecnologias de biocombustíveis, listadas na Tabela 10, tendo em vista a sua importância em cenários futuros de mitigação climática. Em especial para as tecnologias avançadas, há pouca informação já consolidada, portanto, foi necessária uma explicação mais extensa sobre as hipóteses adotadas na consideração do coeficiente técnico. A seguir é descrito para cada tecnologia estudada, a metodologia para determinação do coeficiente técnico.

3.2.2.1.1. *Energia Secundária – Setor Elétrico*

Para todas as tecnologias selecionadas neste estudo para a geração de eletricidade, foram utilizados os coeficiente técnicos propostos por VÁSQUEZ-ARROYO (2018)[15]. Para essas tecnologias, há um uso significativo de água, referente a retirada, que varia de acordo com o sistema de resfriamento adotado. Para a adoção dos coeficientes, foi considerado que cada tipo de sistema de resfriamento utilizado nas usinas termelétricas possui diferentes necessidades de retirada de água e consumo hídrico. Neste estudo foram identificados dois tipos de sistemas de resfriamento: (i) resfriamento aberto (OC[16]) e (ii) sistema de torre de resfriamento úmido (WCT[17]).

Vásquez-Arroyo (2018) realizou um mapeamento sobre a distribuição e tipos de sistemas de resfriamento para cada usina termelétrica no país. O levantamento de informação realizado por Vásquez-Arroyo (2018) mostra que as termelétricas brasileiras têm cerca de 90% de OC e 10% de WCT. Essa distribuição é considerada no ano base do modelo (2010). Para a projeção foi considerada que até 2050, a distribuição do sistema de resfriamento migrará para a proporção de 50% do OC e 50% do WCT em todas as usinas termelétricas, conforme progressão mostrada na Tabela 11, conforme proposta pela autora Vásquez-Arroyo (2018).

---

[15] Todas as considerações feitas podem ser vistas com mais detalhes na Tese de Doutorado de (VÁSQUEZ-ARROYO, 2018)

[16] Sistema de resfriamento aberto (sigla do inglês – *Open Cooling*)

[17] Sistema de resfriamento a torre úmida (sigla do inglês – *Water Cooling Tower*)

Tabela 11:Distribuição de sistema de resfriamento no período 2010 - 2050

	OC	WTC
2010	0,9	0,1
2015	0,9	0,1
2020	0,8	0,2
2025	0,8	0,2
2030	0,7	0,3
2035	0,7	0,3
2040	0,6	0,4
2045	0,6	0,4
2050	0,5	0,5

Fonte: baseado em VÁSQUEZ-ARROYO (2018)

O sistema de resfriamento aberto (OC) possui uma retirada muito superior de água, contudo, em geral, um consumo menor. O sistema fechado a torre úmida (WTC), possui uma menor necessidade de retirada de água, pois apenas a água é recirculada internamente, sendo necessário apenas a reposição da água perdida por evaporação nas torres de resfriamento.

Outros autores como FRICKO *et al.* (2016a) também estudaram a possibilidade da substituição por tecnologias de resfriamento a seco. Esse tipo de tecnologia é mais caro, e possui maior consumo parasítico, na sua implementação e operação, contudo o uso de água é nulo, apresentando um grande benefício nesse aspecto. Essa possibilidade não foi considerada neste estudo pois ainda não se configura em uma alternativa usada atualmente. Além disso, para considerá-la seria necessário integrar o custo da escolha dessa tecnologia na função objetivo de minimização de custos.

3.2.2.1.2. *Energia Secundária – Setor Biocombustíveis*[18]

Para as outras tecnologias, foi feito um levantamento na literatura para se determinar o balanço hídrico de cada uma das tecnologias propostas na lista, conforme a metodologia na Figura 21.

[18] Esta seção serviu como base do Relatório elaborado para o Greenpeace em 2019.

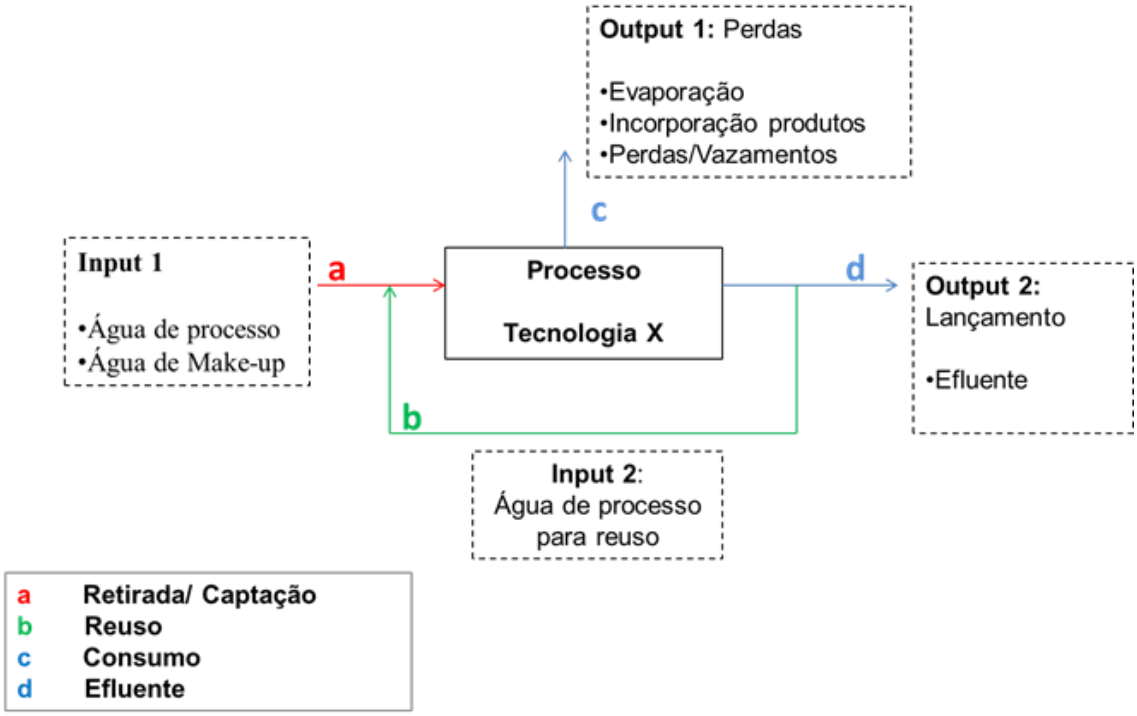


Figura 21: Fluxograma do Balanço Hídrico proposto para Cálculo do Coeficiente Hídrico

Nos artigos encontrados na literatura, a definição de retirada, uso e consumo nem sempre coincidia com o que foi explicitado anteriormente na Seção 2.2.1. Por vezes, o uso do processo foi referido como consumo de água do processo. Nesses casos, para adequar os valores às definições de ANA adotadas neste trabalho para a retirada e consumo de água foram utilizados parâmetros encontrados na literatura para estimativa de perda e consumo de água.

Essas estimativas são válidas de maneira genérica para os principais consumos de água de uma planta industrial, determinados para o sistema de água de resfriamento e para o sistema de vapor. Dependendo do processo, pode haver outros tipos de perdas e consumos como incorporação do produto ou subprodutos.

a- Biodiesel

A cadeia de produção do biodiesel inclui diversas etapas que vão desde a plantação de cultivos agrícolas, extração e *degomagem* do óleo, até a produção do biodiesel e finalmente sua distribuição e revenda aos consumidores (PARENTE, 2003 *apud* MÜLLER, 2012). Para este estudo, os coeficientes hídricos foram calculados

isoladamente para as diferentes etapas do processo. A água utilizada na etapa de plantação será considerada na contabilização da água no setor agrícola. As etapas de extração e *degomagem* do óleo e distribuição e revenda serão consideradas no setor industrial e serviços, visto que o óleo tem inúmeras outras destinações que não a produção de biodiesel. A etapa do processo considerada aqui trata-se da parte de produção do biodiesel em si, que consiste na conversão de óleo em biodiesel.

A principal rota de produção utilizada na indústria atualmente é a transesterificação homogênea alcalina de ésteres alquílicos com um álcool de cadeia curta, geralmente o metanol (DE MELLO *et al*., 2017). Apesar de a rota metílica, isto é, que utiliza álcool metílico, ser a mais largamente empregada, também é possível a rota etílica, a partir do etanol hidratado. Como o metanol é de origem fóssil, esse biodiesel não será inteiramente de origem renovável. O etanol apresenta a vantagem de ser renovável e sua produção ser consolidada no Brasil. Por outro lado, há uma maior dificuldade na etapa de separação e recuperação do etanol. Altamirano *et al*. (2016) constataram que a substituição da rota metílica pela rota etílica não atribui outros benefícios ambientais significativos, que não o menor potencial de aquecimento global. Ambas as possibilidades foram consideradas neste estudo.

As matérias primas para produção do óleo utilizado no processo são oleagionosas como a soja, a mamona, o algodão, o girassol, o dendê, a canola, o amendoim e o pinhão-manso, dentre outras possibilidades como óleos residuais (MÜLLER, 2012). A soja é a matéria-prima mais utilizada mundialmente para produção de biodiesel. No Brasil corresponde a 75% da produção total deste biocombustível (MELLO *et al*., 2017). A utilização da soja possui a grande vantagem de já possuir uma cadeia produtiva altamente organizada, com uma estrutura de produção e distribuição consolidada, e uma situação econômica estável (GOLLO *et al*., 2010). Justificando-se assim a escolha pelo biodiesel produzido a partir de óleo de soja para o cálculo do coeficiente.

A utilização de água no processo de transesterificação ocorre nas etapas de resfriamento de equipamentos e processos; geração de vapor nas caldeiras, para uso posterior em procedimentos de secagem e aquecimento em quase todas as etapas;

remoção de impurezas do óleo após ser submetido à reação de neutralização; purificação do biodiesel depois da reação de transesterificação (MÜLLER, 2012).

Müller (2012) reportou uma variação de 0,38 a 0,64 tonelada água por tonelada de cana processada, a partir de dados obtidos do licenciamento ambiental para duas empresas produtoras no Rio Grande do Sul. A diferença é justificada devido à prática de recirculação de efluentes, reduzindo o consumo de água no primeiro reportado. Esses valores são coerentes com a revisão feita por O'CONNER (2010) que relata uma variação entre 0,32 e 1 t água/t cana, e adota a mediana 0,66 como valor mais representativo do range.

Altamirano *et al*. (2016) e De Mello *et al.* (2017) ambos fazem simulações para as duas rotas, e constatam em ambos os casos um consumo de água de 1,6 a 1,9 vezes maior para rota etílica na etapa de separação e recuperação do etanol. Portanto, os valores adotados para a rota metílica foram os reportados por Müller (2012) da empresa sem recirculação, pois foram considerados mais representativos e de acordo com os outros valores reportados na literatura. O consumo para a rota etílica foi multiplicado por um fator médio de 1,8 vezes o valor da rota metílica. Os valores utilizados na conversão foram os reportados para o biodiesel no balanço energético nacional (BEN, 2017) de 880 kg/m^3 para densidade e 9 kcal/kg para poder calorífico inferior.

b- Bioetanol

A produção de etanol brasileira possui peculiaridades que o distinguem do resto do mundo e o levaram à posição de destaque no setor sucroalcoleiro. É fundamental observar que o etanol é produzido majoritariamente a partir de cana-de-açúcar no Brasil. Este fato gera uma complexa interdependência entre a produção de açúcar e a produção de etanol, que precisa ser explorada de maneira cuidadosa.

Devido à grande importância do setor sucroalcoleiro para o setor energético, ele é representado à parte do setor industrial no modelo BLUES. Assim como as outras culturas energéticas, o cultivo da cana-de-açúcar requer uma maior atenção e detalhamento devido à sua interação com outros setores, uma vez que a cana-de-açúcar não é destinada

unicamente para o setor energético. Contudo, de maneira semelhante ao biodiesel, a contabilização das etapas da cadeia de produção do etanol foi feita de maneira fragmentada. A água necessária para irrigação das culturas de cana-de-açúcar será quantificada através dos coeficientes hídricos específicos de irrigação a partir dos dados do modelo para setor agrícola. As etapas subsequentes serão consideradas aqui, de acordo com o detalhamento tecnológico disponível pelo modelo.

O etanol pode ser diferenciado tanto pelo tipo de matéria-prima utilizada na sua produção quanto pela rota tecnológica utilizada para produzi-lo. É denominado etanol de 1ª geração aquele produzido a partir de culturas que também tem finalidade alimentar como cana-de-açúcar, milho, sorgo, beterraba entre outros. O etanol de 2ª geração é feito a partir de resíduos de alimentos ou que não tem destinação alimentar. O etanol de 2ª geração apresenta maiores custos de produção, mas permite maior aproveitamento de resíduos da indústria e não leva a competição entre destinação de culturas alimentares.

No Brasil cerca de 70% das usinas existentes produzem tanto açúcar quanto etanol a partir de cana-de-açúcar (STRAVAS, 2015). Tais usinas são denominadas de usinas anexas, pois possuem uma unidade de destilaria anexa à usina, responsável pela produção de etanol. Tal configuração possibilita uma maior flexibilidade operacional, podendo priorizar a produção de um ou outro produto de acordo com a demanda e preço de mercado, ou outras variáveis relevantes. As usinas existentes destinadas apenas à produção de etanol são denominadas usinas autônomas. No modelo utilizado neste estudo é feita a discriminação entre usinas autônomas e anexas. Além disso, se são novas ou antigas. Essa informação é relevante tanto do ponto de vista energético quanto do ponto de vista de impacto hídrico devido à sua demanda de vapor no processo.

Além da caracterização do tipo de usina, outras desagregações são possíveis no modelo e, portanto, foram consideradas sempre que fosse coerente do ponto de vista de impacto hídrico. Tanto para aplicação como combustível, como para outros fins, é essencial distinguir se o etanol se trata de etanol hidratado (EHC), que é o comumente encontrado como combustível puro no Brasil, ou se se trata de etanol anidro (EAC), que é utilizado como aditivo para elevar o teor de oxigenados da gasolina. Além de terem aplicações distintas, o processo de obtenção de etanol anidro passa por uma etapa além para chegar ao grau de pureza desejado, portanto, acarreta tanto num maior gasto

energético, quanto numa maior necessidade hídrica para o processo. Outra opção também contemplada pelo modelo é a existência de usinas com tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS), contudo, para fins de impacto hídrico foi considerado irrelevante este nível de desagregação.

O cálculo dos coeficientes hídricos para o bioetanol é um pouco mais complexo devido às características da sua produção, e da dimensão do detalhamento tecnológico disponível no modelo. O nível desagregação tecnológica permitida pode ser visto no fluxograma abaixo (Figura 22).

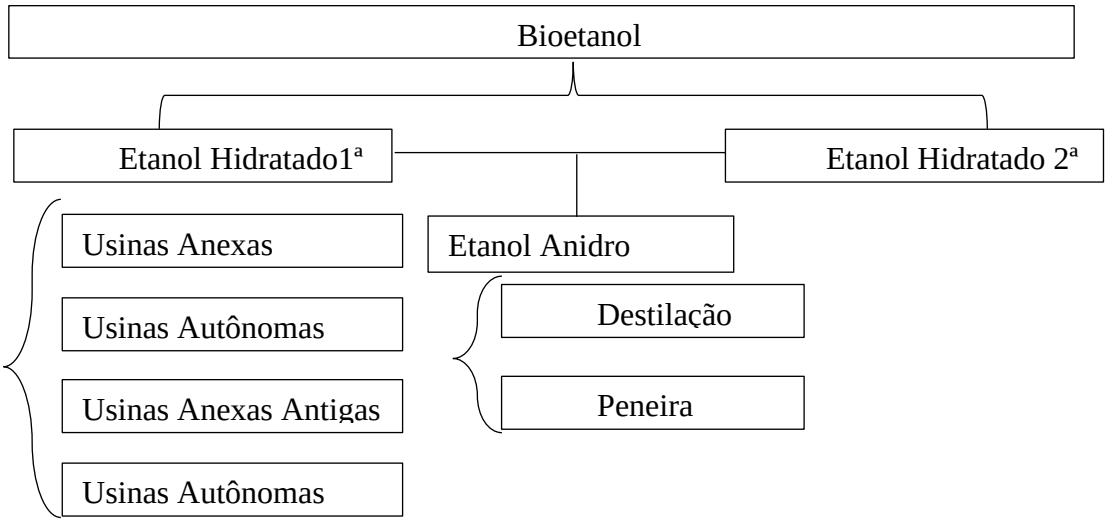


Figura 22: Fluxograma de desagregação de tecnologias para Bioetanol

Fonte: Elaboração Própria

É importante também observar que o sistema de cogeração, isto é, geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar foi calculado já na parte dos coeficientes do setor elétrico. Portanto, com base nos valores encontrados na literatura para cada etapa no processo, os valores foram calculados de maneira a evitar uma dupla contagem.

Uma compreensão ainda melhor sobre as fronteiras das etapas do processo na determinação dos coeficientes hídricos é possível através da Figura 23.

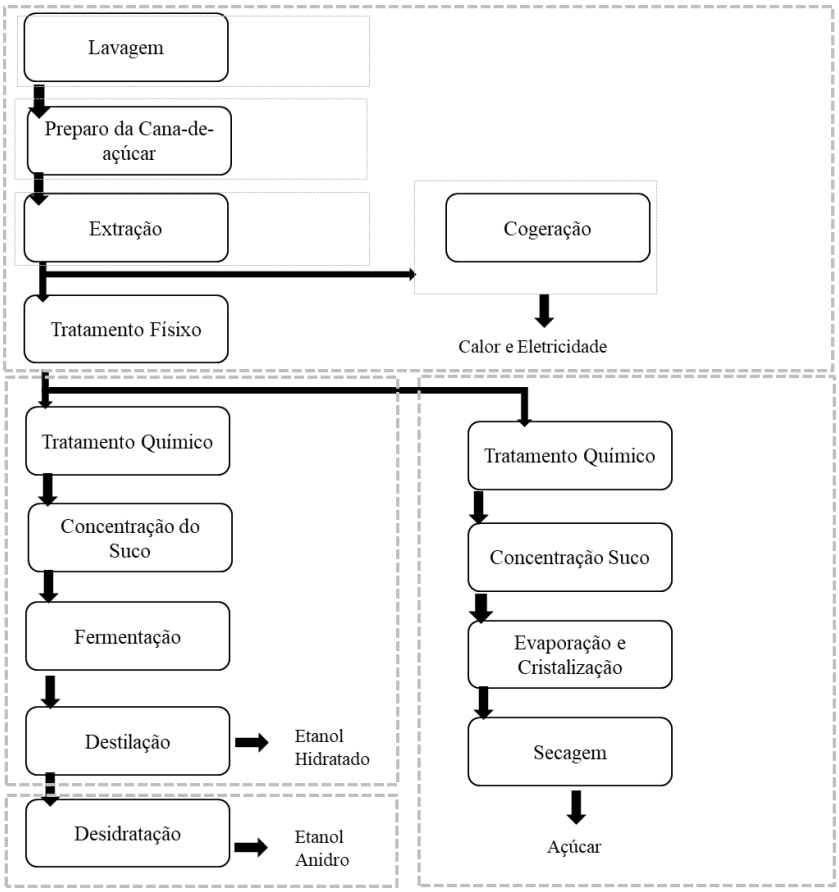


Figura 23: Fluxograma das etapas do processo de produção de Etanol 1ª Geração

Fonte: adaptado de ALBARELLI *et al.*, 2014

O processamento industrial do açúcar e etanol é conhecido pelo uso intenso de água chegando a valores 15 a 22m³/t cana processada (NETO,2013; RODRÍGUEZ, 2010). Contudo, isso não significa que a retirada de água dos corpos hídricos ocorra na mesma dimensão, pois a captação de água vem diminuindo de forma abrupta no decorrer das últimas décadas, devido às práticas de reuso de água (NETO,2013).

Devido ao estado de São Paulo ser o principal produtor de cana-de-açúcar do Brasil e aos impactos potenciais associados a esta cultura, há para esse estado um Zoneamento Agroambiental para o setor Sucroalcooleiro que visa disciplinar sua expansão e orientar o licenciamento ambiental de novos empreendimentos (GOMES e MONTAÑO, 2012). A resolução SMA88/2008, portanto, determina que novos empreendimentos deverão atender a captação máxima de 1m³/tonelada de cana processada, e que as usinas já instaladas deverão apresentar um plano de redução para o mesmo valor em um prazo de 15 anos. Com base nessas informações, portanto, foi estipulado o valor para as usinas

classificadas como novas. Apesar da legislação ser a nível estadual, foi considerada representativa para todo país.

Como a etapa de moagem da cana-de-açúcar configura um coeficiente separado é necessário conhecer o balanço hídrico detalhado por etapas do processo, para que a ponderação entre as etapas seja feita de maneira coerente. .RODRÍGUEZ (2010) e NETO (2013) fizeram um balanço hídrico considerando o uso, consumo e captação de água para as diferentes etapas do processo. Esses valores foram utilizados no cálculo das usinas antigas.

É importante notar também que no processo de produção de açúcar a matéria-prima consiste na cana, que tem água embutida. Logo a entrada de água não é apenas a partir da água captada, mas há outra entrada de água também. Isso gera um consumo aparente maior que a captação, pois a entrada de água no processo ocorre de maneira indireta. Portanto, neste caso o consumo e a captação foram considerados os mesmos. O balanço hídrico geral da planta pode ser visto na figura abaixo.

Figura 24:Balanço Hídrico de uma usina típica brasileira

Fonte: RODRÍGUEZ (2010)

O termo etanol anidro refere-se a esse produto praticamente puro. Segundo as especificações da ANP contém entre 99,3% a 99,8% em massa, com um teor máximo de 0,4% em volume de água. A água e etanol formam uma mistura azeotrópica, o que requer

uma etapa de separação adicional para que se possa obter etanol com elevado grau de pureza. Atualmente o etanol anidro é adicionado em um teor de 27,5% na Gasolina do tipo C como aditivo para aumentar sua octanagem (PETROBRAS, 2015).

Existem algumas rotas tecnológicas para obtenção de etanol anidro como a destilação extrativa, destilação azeotrópica, pervaporação por membranas ou peneira molecular. As opções tecnológicas consideradas no modelo BLUES são as rotas convencionalmente empregadas que são: destilação extrativa com monoetileno glicol (MEG) e peneira molecular. Foram calculados coeficientes hídricos específicos para as duas tecnologias disponíveis para avaliar a diferença de impacto hídrico entre as mesmas.

A destilação extrativa se baseia na adição de um terceiro componente à mistura azeotrópica água-álcool, com o objetivo de alterar suas características de equilíbrio líquido vapor possibilitando sua separação, necessitando posteriormente de uma etapa de recuperação deste solvente adicionado.

A peneira molecular trata-se de um material com poros extremamente pequenos e de tamanhos precisamente uniformes, de maneira que são capazes de bloquear a passagem de moléculas grandes, enquanto permitem a percolação de moléculas menores. (KANG *et al*., 2014), permitindo assim a separação de água e etanol obtendo o álcool em elevado grau de pureza.

É importante notar que as tecnologias de obtenção de etanol anidro partem do etanol hidratado. Portanto, o coeficiente hídrico considerado aqui representa o gasto adicional de água para se produzir etanol anidro. BARRETO, COELHO (2015) analisam o processo de isolamento da biorrefinaria, portanto apresentam valores para o uso de água de resfriamento necessária e uso de vapor na planta. São de 35-38 m^3 água resfriamento /m^3 álcool e 0,78 kk vapor/ l álcool para destilação extrativa e 40-45 m^3 água resfriamento /m^3 álcool e 0,75 kk vapor/ l álcool para peneira molecular. Portanto, para calcular os coeficientes de consumo e retirada foram feitas algumas considerações. Considerou-se, conforme proposto por (INGARAMO, HELUANE, *et al*., 2009), que, para o sistema da torre de resfriamento, o consumo consiste em 1% da vazão de circulação para cada 5,56ºC de redução de temperatura, devido à evaporação em torres e 0,2% da vazão de circulação referente à perdas. Para o sistema de água de caldeira, o consumo foi considerado 4% da

quantidade de vapor requerido referente às perdas no sistema. O resumo das considerações pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12: Perdas de água associadas

Tipo de Perda	**Perdas associadas**
Sistema Vapor-Condensado	2% do vapor
Efluente *(Slurry)*	2,6t/100 t cana 3 t/100 t cana
Sistema de água de Caldeira (**Purga/*make-up*)**	4% do vapor
Refrigeração da Maquinaria	0,9% da água circulante
Cristalização e Filtração	negligenciável
Sistema de Condensado (Torre de Resfriamento)	Evaporação: 1% da vazão de circulação para cada 5,56°C Perdas: 0,2% da circulação da torre.

Fonte: INGARAMO *et al.* (2009),

Com isso foram calculados coeficientes para o consumo. A segunda hipótese é de que esta água é perdida e não volta para o sistema, por isso, precisa ser reposta através de captação de água, fazendo com que o coeficiente de retirada seja o mesmo que o consumo, e o efluente zero. Os valores assumidos, portanto, para as duas rotas tecnológicas possíveis para obtenção de etanol anidro encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 13:Coeficientes Hídricos para produção de etanol anidro

Etanol Anidro	**Retirada (kg água/l álcool)**	**Consumo (kg água/l álcool)**	**Retorno (kg água/l álcool)**
Destilação Extrativa	0,5	0,5	0
Peneira Molecular	0,5	0,5	0

Fonte: Baseado em BARRETO, COELHO (2015)

O etanol de 2ª geração utiliza como matéria-prima biomassas que não são destinadas para alimentação, possuindo grande potencial para aproveitamento de

biomassa que outrora seria resíduo. Dentre estes exemplos figuram os resíduos derivados de atividades tais como as indústrias de papel e celulose, serrarias, usinas de açúcar e álcool (bagaço de cana-de-açúcar) e, de um modo geral, unidades de produção agrícola geradoras de resíduos de culturas como a palha de cereais, de milho, de trigo, sabugo de milho, cascas de arroz e de aveia, dentre outros (RAMOS, 2000).

Existem basicamente 2 plataformas identificadas atualmente para obtenção do etanol de 2ª geração. A primeira se configura na plataforma bioquímica que consiste em uma hidrólise enzimática mais fermentação. A segunda é a plataforma termoquímica que é baseada em processos de conversão termoquímica pela reação de matéria-prima em altas temperaturas com uma quantidade de oxigênio controlada (gaseificação) para produzir gás de síntese ($CO + H_2$) ou na ausência de oxigênio (pirólise) para produzir bio-óleo, que depois de um processo de hidrodeoxigenação produz uma mistura líquida de hidrocarbonetos similar àqueles presentes no petróleo.

No modelo apenas é considerada a primeira rota. Dentre as tecnologias empregadas pelas empresas para produção de etanol de 2ª geração, a maioria baseou-se na hidrólise enzimática (plataforma sucroquímica) (CGEE,2010). Além do mais, essa rota é mais coerente e também mais economicamente viável para o contexto brasileiro que apresenta uma planta da Raízen- Cosan para rota bioquímica. Dessa forma, o modelo representa apenas a rota bioquímica, pois ela é mais coerente com a realidade e as particularidades do Brasil, sendo apenas considerado um coeficiente hídrico.

A grande diferença entre a produção do etanol de primeira e segunda geração pela rota bioquímica é que a matéria-prima de segunda geração necessita de um pré-tratamento anterior para quebrar o material lignocelulósico, e liberar os açúcares uma vez que as leveduras que fazem a fermentação não são capazes de fazê-lo. Esta etapa adicional no processo leva a um maior gasto energético e hídrico.

WU *et al.,* (2009) reportaram um valor de 9,8 l água/l etanol para a rota tecnológica de hidrólise enzimática seguida de fermentação, e um valor de 5,98 l água/l etanol para o processo otimizado. MARTÍN, AHMETOVIC & GROSSMANN (2010) reportaram uma variação de 6 -9,8 l água/l etanol dependendo da matéria-prima utilizada.

Enquanto HUMBIRD *et al.* (2011) reportaram um valor de retirada de 5,35 l água/l etanol e um consumo de processo de 7,65 l água/l etanol conforme demonstrado no balanço hídrico na Tabela 14.

Tabela 14:Balanço Hídrico Planta de Produção de Etanol 2ª Geração

Entradas	**kg/h**	**m^3/m^3**	**Saídas**	**kg/h**	**gal/gal**
Umidade na matéria-prima	20,83	0,76	Água no produto (etanol)	109	0,0
Água em glicose	427	0,02	Evaporação torre resfriamento	137,36	5,0
Água em químicos brutos	3,06	0,03	Carreada na aeração	774	0,03
Gerada na produção enzimática	1,3	0,02	Válvula Coluna limpeza	522	0,02
Gerada na fermentação	121	0,00	Destruída pré-tratamento	2,47	0,09
Gerada no Tratamento de Efluentes	2,68	0,10	Destruída na hidrólise enzimática	2,63	0,1
Gerada na Caldeira	23,87	0,87	Evaporação Tratamento de água	4,35	0,16
Injeção água secagem de torta lignina	638	0,02	Lama residual do	4,96	0,18
Entrada água lagoa aerada	237	0,01	Tratamento de Efluente	54,45	1,98
Tratamento de Efluentes	4,38	0,16	Caldeira	2,58	0,09
Entrada ar combustor	5,57	0,20			
Água de Make-up	147,14	5,35			
Soma das entradas	210,2	7,65	Soma das saídas	210,2	7,65

Fonte: adaptado de HUMBIRD *et al.* (2011)

Tabela 15:Coeficientes Hídricos para produção de Etanol de 2ª Geração

Etanol 2ª Geração	**Retirada (l água/l álcool)**	**Consumo (l água/l álcool)**	**Retorno (l água/l álcool)**
Rota Enzimática Bioquímica	5,4	7,7	0

Fonte: Baseado em HUMBIRD *et al.* (2011)

3.2.2.1.3. *Bioquerosene e Diesel Verde*

O querosene de aviação (QAV) é um dos combustíveis com maior rigor quanto às especificações, devido ao grau de confiabilidade necessária para sua utilização (KANDARAMATH HARI *et al.*, 2015, WANG *et al.*, 2016). Por esta razão, as rotas de produção de bioquerosene, isto é, querosene de origem renovável baseiam-se em rotas tecnológicas para obtenção de hidrocarbonetos mais idênticos ao corte do QAV.

Atualmente existem três rotas tecnológicas de produção de bioquerosene certificadas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para uso comercial, que adota critérios rígidos para aceitação de misturas de biocombustíveis com QAV (CARVALHO, 2017). São elas: hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA[19]), processamento térmico da biomassa (BTL[20]) e oligomerização de álcool (ATJ[21]). O processo HEFA é considerado o processo com maior grau de maturidade para produção de bioquerosene, levando em consideração o status de comercialização e processos tecnológicos DIEDERICHS *et al.* (2016).

Dessa maneira, as três rotas certificadas foram consideradas para o cálculo de coeficiente hídrico. A Figura 25 mostra as etapas das rotas tecnológicas possíveis consideradas para produção de bioquerosene.

---

[19] HEFA: hydroprocessed esters and fatty acids

[20] BTL: Biomass to Liquid

[21] ATJ: Alcohol to Jet

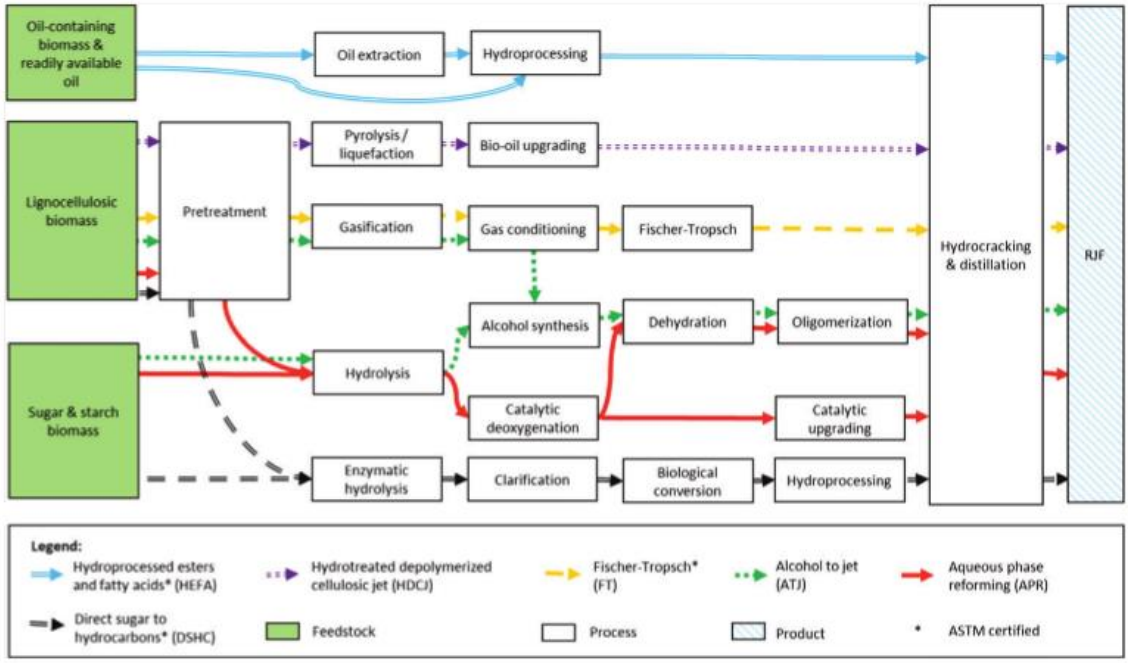


Figure 1. RJF conversion pathways: feedstocks and processes.

Figura 25: Rotas Tecnológicas para produção de bioquerosene

Fonte:DIEDERICHS *et al.* (2016)

No processo é necessário água de resfriamento e vapor, por exemplo, para pré-aquecer a corrente antes de entrar no reator e para dar calor no *reboiler* da fracionadora, entre outros. A água consumida é a água perdida devido ao *blow-down*, perdas por evaporação ou convecção e exportação de água do sistema como perda de vapor pelo vento para atmosfera. (PEARLSON, 2011) assumiu que todas essas perdas consomem 5% do total de água circulante no sistema de resfriamento e 100% da água para vapor que não é recuperada como condensado. O autor reporta um valor total de 0,9 gal de água por galão de óleo vegetal alimentado, sendo 0,8 relativo à demanda para água de make-up e 0,1 para o sistema de reforma de metano para geração de H_2 necessário no processo. Há ainda a geração de água que pode ser tratada e reutilizada para reduzir o consumo de água de reposição.

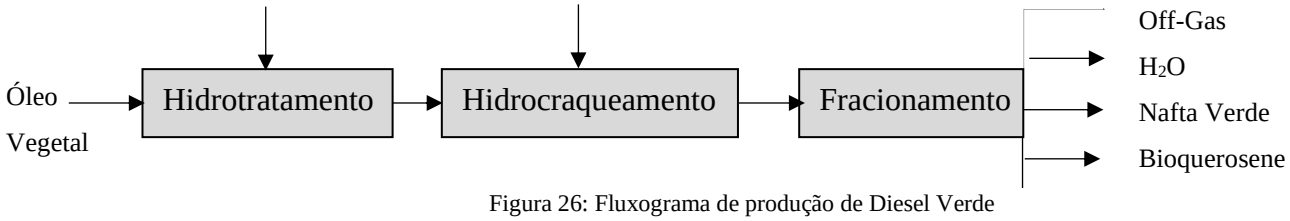


Figura 26: Fluxograma de produção de Diesel Verde

Fonte: Adaptado de KLEIN, CHAGAS *et al*. (2018)

Na retirada de água foi considerado o valor necessário para suprir o consumo de água (água de reposição), uma vez que não foram encontrados valores para quantidade de efluente descartada neste processo. Os valores para os coeficientes podem ser vistos na Tabela 16.

Tabela 16: Coeficiente Hídrico para produção de bioquerosene por hidroprocessamento (HEFA)

Retirada	**Consumo**	**Retorno**
m^3 água/ m^3 óleo vegetal	**m^3 água/ m^3 óleo vegetal**	**m^3 água/ m^3 óleo vegetal**
0,9	0,9	0

Fonte:

O processo mais conhecido como ATJ, também chamado de oligomerização do álcool, diz respeito à conversão de álcoois como metanol, etanol, butanol em alcanos, com ênfase no bioquerosene. Esta rota foi certificada apenas em 2019 (WANG e TAO, 2016) .

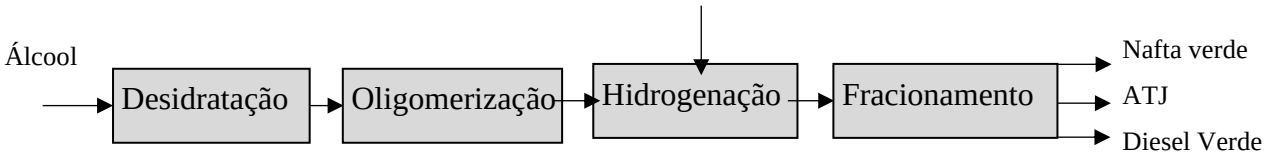


Figura 27:Fluxograma de Processo de obtenção de ATJ

Fonte: Adaptado de KLEIN, CHAGAS, *et al.*, (2018)

A rota de produção de ATJ pode ser feita a partir de diversos álcoois. As etapas do processo consistem em desidratação do álcool + oligomerização + hidrogenação, sendo necessária uma unidade de produção de hidrogênio (H2). A tecnologia de ATJ considerada tem como entrada o álcool, que nesse caso será o etanol, e é transformada em querosene. O coeficiente hídrico considera apenas as etapas do processo subsequentes à produção do etanol (ver Tabela 17) conforme representada no fluxograma acima. Há ainda poucas referências de literatura disponíveis para ATJ e não foram encontradas referências na literatura com informação direta da necessidade hídrica deste processo.

Dessa forma, para contornar este problema, as etapas do processo foram vistas separadamente para que se pudesse ter uma estimativa inicial para o valor.

ARVIDSSON (2011) simulou uma planta autônoma de produção de eteno a partir da desidratação de etanol. Nessa etapa do processo é necessária injeção direta de vapor de média pressão na alimentação do reator de eteno, responsável pelo maior uso de água no processo. O efluente é gerado na Torre de contato direto (quench), em grande quantidade, no compressor e a torre de soda em menor quantidade.

Tabela 17:Coeficiente Hídrico para rota ATJ para produção de bioquerosene

Retirada (Mm³/MWa)	**Consumo (Mm³/MWa)**	**Retorno (Mm³/MWa)**
2,9	1,2	1,7

Fonte: Baseado em (ARVIDSSON, 2011)

O fluxograma abaixo mostra as etapas simplificadas do processo de produção de bioquerosene a partir da síntese *Fischer-Tropsch*. Nessa rota tecnológica é necessária uma gaseificação da biomassa para formação de gás de síntese (CO e H_2), que irão reagir na presença de catalisadores para formar hidrocarbonetos líquidos. A composição do produto varia dependendo da razão entre hidrogênio e monóxido de carbono, o catalisador e condições de processo (LIU *et al.*, 2013).

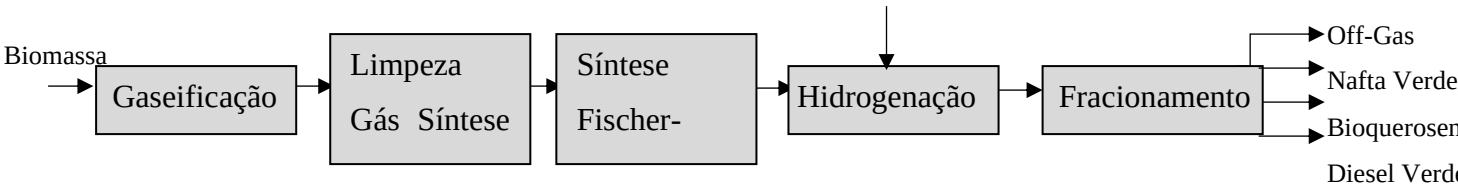


Figura 28: Fluxograma simplificado das etapas do processo de bioquerosene via FT

Fonte: Adaptado de KLEIN *et al.* (2018)

Tabela 18:Coeficiente Hídrico para produção Bioquerosene via Fischer-Tropsch

Retirada (Mm³/GJ)	**Consumo (gal/mmBtu)**	**Retorno (gal/mmBtu)**
0,245	0,245	0

Fonte: TARKA (2012)

Das três rotas tecnológicas descritas para produção de bioquerosene, o diesel verde também é obtido como coproduto. A rota considerada para o diesel verde foi a rota via *Fischer Tropsch*, pois é a rota mais comumente utilizada. Dependendo do tipo de catalisador e condições de processo, pode ser alterado para favorecer mais a geração do diesel verde, aumentando o corte e sua produção. Contudo, considerou-se que tais alterações de processo não causam diferenças significativas no consumo e retirada de água, portanto o coeficiente utilizado será o mesmo para a rota de bioquerosene via Fisher-Tropsch- BTL.

3.2.2.1.4. *Energia Primária*

Extração de carvão mineral

As atividades de exploração do carvão mineral podem ser do tipo subterrânea ou a céu aberto. O modelo de otimização BLUES não distingue a produção de carvão entre minas a céu aberto e minas subterrâneas. Dessa maneira, assume-se que a contabilização da retirada e consumo de água do carvão mineral será produzido em minas a céu aberto, pois o uso de água para esse tipo de tecnologia é mais significativo.

Os valores máximos indicados por FTHENAKIS e KIM (2010) são usados como referência para exploração e a preparação de uma mineradora de carvão mineral a céu aberto nos Estados Unidos de América.

Para espacialização foi considerado a localização real das maiores jazidas situadas e a proporção do volume de reservas, em que o Rio Grande do Sul responde por 89,25%; Santa Catarina, 10,41%; Paraná, 0,32% e São Paulo, 0,02% (BRASIL, 2008)

Tabela 19:Coeficientes hídricos para a extração de carvão mineral

Retirada de água (m^3 /GJ)	Consumo de água (m^3 /GJ)	Efluente (m^3 /GJ)
0,056	0,027	0,029

Fonte: Elaboração própria baseado em Fthenakis e Kim (2010)

Shale Gas[22]

O *shale gas* tem um uso intensivo de água durante a exploração, e não durante a extração do recurso, constituindo 86% da água direta necessária para a extração de *shale gas* (COOPER *et al.*, 2016). Para a exploração é necessária uma estimulação por fraturamento hidráulico, que pode exigir entre 3000 a 25000 m^3 de água por poço horizontal, dependendo da sua profundidade, distância horizontal, e do número de vezes que o poço é fraturado (EPA, 2010, COOPER *et al.*, 2016, HOLDING *et al*., 2017)

Não se acharam dados relativos ao uso de água para o Brasil. Foi assumido que a retirada de água esteja em 19000 m^3 / poço explorado, valor máximo reportado para bacia sedimentar Marcellus nos Estados Unidos de América (CLARK *et al.*, 2011). É assumido um valor máximo de água uma vez que, o uso intensivo da água acontece durante os trabalhos de exploração e procura do recurso, onde somente uma percentagem dos poços fraturados tem produção de *shale gas*. Por outro lado, assume-se que todo o *flowback* será utilizado para injeção subterrânea, de forma que água retirada será consumida.

RODRIGUEZ-CHAVEZ *et al.* (2017) realizam uma estimativa da quantidade de *shale gas* que poderia ser extraído de um poço na Argentina, cuja produção é utilizada como referência para o cálculo de retirada, consumo e retorno. Assim, os coeficientes hídricos são mostrados a seguir:

[22] O valores dos coeficientes para energia primária foram utilizados conforme o estudo realizado para o Greenpeace.

Tabela 20:Coeficientes hídricos para exploração do shale gas

Retirada de água (m^3 /GJ)	**Consumo de água (m^3 /GJ)**	**Retorno (m^3 /GJ)**
3.367E-06	3.367E-06	0

Petróleo e Gás

As necessidades de água para explotação e produção de petróleo e gás convencional variam muito, dependendo do ciclo de combustível (extração, processamento e transporte). No Brasil, o óleo e gás natural são combustíveis cuja exploração é realizada *off-shore* (principalmente), portanto, a princípio não foi considerado um uso de água para essa tecnologia.

Refino

Para o refino foram considerados os coeficientes propostos em VASQUEZ *et al*. (2016), conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21: Coeficientes hídricos para refinaria de produtos de petróleo

Retirada de água (m^3/GJ)	Consumo de água (m^3/GJ)	Efluente (m^3/GJ)
0,025	0,008	0,017

Fonte: Baseado em VASQUEZ *et al.* (2016)

Para a espacialização das demandas foi utilizado o levantamento feito por SOUZA, (2018), conforme apresentado na Tabela 22. Foi considerado que seria mantida a configuração atual para todo o período estudado, baseado nos resultados dos modelos de avaliação integrada, em que não há expansão significativa da produção de petróleo, migrando para outras tecnologias energéticas menos carbono-intensivas.

Tabela 22: Espacialização do uso de água para o refino

UF		Refinaria	Demanda	kbbl/d
SP	PRN	RECAP	0,23	55
RJ	ASD	REDUC	0,24	245
RS	ASU	REFAP	0,31	205
MG	SFO	REGAP	0,08	155
AM	AMZ	REMAN	0,36	50
PR	PRN	REPAR	0,35	210
SP	PRN	REPLAN	0,65	415
SP	ASD	REVAP	0,34	255
BA	ALT	RLAM	0,44	280
PE	AOR	RNEST	0,01	115
SP	ASD	RPBC	0,07	170
RN	AOR	RPCC	0,04	40

Fonte: SOUZA, (2018)

3.2.2.2. Espacialização da demanda

Para a localização espacial da demanda foram utilizados as bases de dados georreferenciadas da (ANA, 2019c), a base de dados da EPE e da ANEEL (ANEEL, 2020, EPE, 2020). De maneira similar com a metodologia proposta para irrigação, a espacialização foi feita a partir de duas matrizes, uma com os dados baseados nas referências históricas para os anos de 2010 e 2015 e uma segunda matriz com os dados para expansão do setor energético, conforme pode ser visto na Figura 29.

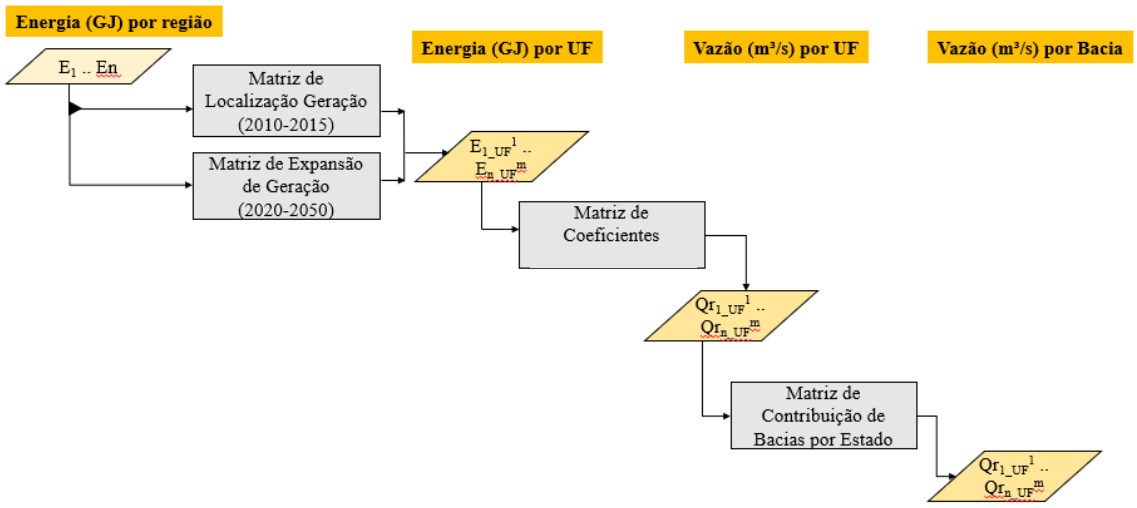


Figura 29: Metodologia para espacialização das demandas do setor energético

Para determinação do critério de espacialização, as tecnologias estudadas foram agregadas conforme a tabela abaixo, em que UTE, representa as tecnologias associadas a geração de energia termoelétrica, UTN representa tecnologia de geração energia nuclear e UPV representa as tecnologias de geração de energia solar e fotovoltaica. Para a expansão foram somadas a potência instalada de todas as usinas já existentes com a potência total em construção ou projetada para cada uma das categorias estudadas.

Para as usinas térmicas foram utilizados os dados do banco de informações de geração e o sistema de informações geográficas da ANEEL, exceto para a térmica a biomassa em que se considerou como critério para localização da expansão a proximidade à produção de biomassa lenhosa, principalmente.

Para usina nuclear foi considerado que possíveis expansões ocorrerão no mesmo local, em que se encontram atualmente. O Plano Nacional de Energia (PNE 2050) da EPE para o horizonte de 2050 prevê a expansão de novas usinas nucleares. Contudo, para fins deste estudo considerou-se aqui apenas a possibilidade de expansão já prevista para o início de operação de Angra 3.

Para as tecnologias de energia solar também foi adotado o mesmo critério para localização, conforme as usinas já existentes somado ao que se pretende adicionar, baseado nos dados da EPE. Para a tecnologia de cogeração de bagaço a projeção da espacialização também foi feita conforme a distribuição atual e projetada para os próximos anos segundo a EPE.

No caso das tecnologias associadas os biocombustíveis, a principal premissa adotada foi que a expansão ocorrerá de acordo com a proximidade da matéria-prima, uma vez que o custo de transporte para longas distâncias teria impactos negativos tanto do ponto de vista de da viabilidade econômica, quanto de emissões associadas ao transporte. Portanto, para as tecnologias associadas à produção de etanol, foi definida a proximidade em relação à cana-de-açúcar e para o biodiesel, foi escolhido a proximidade à soja.

Para todas as fontes primárias foi utilizada a mesma disposição das fontes já identificadas atualmente.

Tabela 23: Resumo dos critérios e fontes de dados para espacialização da demanda de água do setor de energia

Agregação	Tecnologia	Dados georreferenciados para Localização	Critérios para expansão
UTE	Térmica Rankine diesel	ANEEL	Energia em construção/projetada

UTE	Ciclo Combinado	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Ciclo Combinado com CCS	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Térmica Rankine a carvão mineral	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Térmica Rankine a carvão mineral com CCS	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Carvão mineral para IGCC	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Carvão mineral para IGCC com CCS	ANEEL	Energia em construção/projetada
UTE	Térmica Rankine a biomassa	ANEEL	Proximidade a matéria-prima (Biomassa lenhosa)
UTN	Usina nuclear	ANEEL	Mesma disposição
UPV	Solar CSP	ANEEL	Energia em construção/projetada
UPV	Solar PV Centralizada	ANEEL	Energia em construção/projetada
Biomassa	Cogeração a Bagaço	EPE	Energia em construção/projetada
Biodiesel	Transesterificação metanol	EPE	Proximidade a matéria-prima (soja)
Etanol	Transesterificação etanol	EPE	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina anexas antigas s/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina anexas antigas c/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina anexas novas c/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina anexas novas s/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina auton. Antigas	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Destilação p/ Anidro	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Etanol 2a geração	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Hidrólise	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	usina auton. c/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Alcohol-to-Jet	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Bioquerosene HEFA	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Bioquerosene BTL	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Green diesel BTL	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Etanol	Green diesel BTL c/ CCS	EPE, ANA	Proximidade a matéria-prima (cana-de-açúcar)
Shale Gas	Extração Gás Natural (Shale)	FGV Energia 2019	mesma disposição/ gaseoduto
Carvão	Ext. Carvão mineral	ANEEL (Atlas, Cap 9)	mesma disposição
Petróleo	Ext O&G	ANP	mesma disposição

Refino	Refino	EPE	mesma disposição

O modelo BLUES fornece o resultado da quantidade de energia primária produzida através de cada uma das fontes primárias disponíveis (carvão, petróleo, gás, biomassa), bem como a quantidade de energia secundária e a energia final. A energia secundária pode ser dividida pelo menos em duas categorias, uma de geração de eletricidade e uma segunda de combustíveis líquidos. O modelo possui uma gama extensa de tecnologias para a conversão de fontes primárias em energias primárias, tanto para conversão de energia primária em energia secundária. Cada tecnologia possui um custo diferente associado, bem como uma eficiência distinta (KÖBERLE *et al.*, 2018, ROCHEDO *et al.*, 2016, ROCHEDO, 2013, TAGOMORI *et al.*, 2018). A contabilização de água dependerá da quantidade da energia gerada e da rota tecnológica adotada para produção de determinado tipo de energia. Ao se mudar a rota tecnológica, tem-se um processo diferente, consequentemente mudam os requerimentos não só energéticos, mas também hídricos, fazendo-se necessário o cálculo do coeficiente hídrico específico para cada tecnologia.

3.2.2.3. Espacialização

Para a espacialização da demanda foi adotada a premissa conservadora de que a localização dos *clusters* industriais deverá manter-se a mesma para os próximos anos. O dado disponível para projeção da demanda industrial, que também serve de entrada para o BLUES consiste na taxa de crescimento da indústria. Portanto, foi utilizado o Valor da Produção para cada estado brasileiro em 2010, e aplicada a taxa de crescimento para o valor de produção até 2050, conforme descrito na Tabela 24.

Tabela 24: Taxa de Crescimento da Indústria entre 2010 e 2050[23]

	Taxa média de crescimento anual							
Setores	**2010-2015**	**2015-2020**	**2020-2025**	**2025-2030**	**2030-2035**	**2035-2040**	**2040-2045**	**2045-2050**

[23] Essas projeções não consideraram os efeitos econômicos provenientes do Corona vírus no curto prazo

Cimento	-0,26	0,53	3,61	2,58	2,12	1,9	1,75	1,5
Cerâmica	-1,11	-0,37	2,95	2,18	1,86	1,74	1,63	1,47
Química	0,24	-0,39	3,29	2,04	1,4	1,13	0,96	0,84
Alimentos e Bebidas	0,22	0,26	3	2,08	1,63	1,36	1,11	0,89
Ferro e Aço	-0,61	-0,35	2,81	1,92	1,54	1,44	1,42	1,28
Metalurgia	-1,73	-1,28	1,88	1,24	1,02	1	1,01	0,92
Mineração	1,92	0,84	3,44	2,41	1,85	1,5	1,17	0,93
Ferro-ligas	0,51	0,36	2,96	2,3	2,04	1,91	1,76	1,63
Papel e Celulose	0,16	0,27	2,77	1,97	1,59	1,35	1,11	0,88
Têxtil	-0,9	-0,89	2,27	1,42	1,08	0,96	0,86	0,76
Outros	0,04	-0,04	3,56	2,6	2,2	2,09	2,02	1,96

Para a alocação nas bacias de contribuição foram consideradas as outorgas emitidas por (ANA, 2020a). Para o enquadramento das indústrias de acordo com a classificação adotada no estudo, foram acessados, com os números dos CNPJ, os registros cadastrais de pessoa jurídica, obtendo as tipologias de atividade econômica nas quais as empresas se enquadravam segundo a CNAE 2,0 e em seguida fazendo a equivalência. A tabela completa com as equivalências entre as seções, grupos e classes encontra-se no Anexo I.

3.2.3. Quantificação do uso de água para o setor de abastecimento humano

Os dados de crescimento populacional são também um dado de entrada no modelo BLUES, portanto a contabilização de água é feita de maneira totalmente exógena ao modelo, apenas utilizando a mesma premissa de crescimento populacional de forma a manter a consistência e compatível com o cenário climático. A narrativa utilizada nessa dissertação foi a SSP2, "*middle of the road"*, que consiste em um caminho com desafios intermediários e foi utilizado apenas para as premissas macroeconômicas, para se basear em projeções de crescimento populacional, econômico e do PIB.

As projeções das demandas do setor agropecuário do BLUES foram desenvolvidas de acordo com projeções corrigidas do SSP2-BCB10 (DELLINK *et al*., 2015 *apud* ROCHEDO *et al.*, 2018) para as taxas de crescimento do PIB brasileiro de acordo com Koberle *et al*. (2018).

Tabela 25 Projeção para crescimento da população e PIB [24]

Ano	População	PIB (R$ milhões)
2010	195.497.797	4.695.312
2015	204.450.649	4.670.776
2020	212.077.375	4.829.984
2025	218.330.014	5.796.233
2030	223.126.917	6.663.948
2035	226.438.916	7.516.206
2040	228.153.204	8.403.990
2045	228.116.279	9.330.671
2050	226.347.688	10.271.683

Fonte: Köberle *et al.,* (2018)

A metodologia utilizada neste trabalho para a determinação do uso de água para o cálculo do abastecimento humano foi baseada na metodologia proposta por ONS (2005) e ANA (2019b). Para o cálculo do abastecimento humano, ambas metodologias dividem o abastecimento urbano nas categorias de abastecimento urbano e rural. Portanto, para a distribuição da população nas unidades federativas foi feita a distinção entre população rural e urbana, com base no Censo do IBGE (2010) para o ano 2010.

O percentual de população urbana em 2010, de acordo com o censo do IBGE, era de 84%, contudo o percentual da população vivendo em centros urbanos teve aumento nos próximos anos. Dessa forma, as premissas para projeção da população urbana foram feitas combase no estudo *"World Urbanization Prospects:the 2018 revision"*(UN, 2019), que aponta que, em 2050, o Brasil será o 27° país com maior população urbana do mundo, com 92,5% da sua população total vivendo em áreas urbanas. Outra tendência apontada

[24] Essas projeções também não consideraram os efeitos econômicos provenientes do Corona vírus no curto prazo

pelo estudo para o Brasil é de que as duas megalópoles atuais, São Paulo e Rio de Janeiro devem continuar sendo as únicas megalópoles no país. Portanto, foi considerado que um decréscimo linear na população rural, de maneira que em 2050 se alcançasse a proporção estimada. Outra hipótese feita é de que a distribuição rural entre os estados permanece com o mesmo padrão, de forma que há um decréscimo uniforme nas populações rurais de todos os estados, contudo eles continuam distribuídos na mesma proporção.

Para a determinação do crescimento de cada estado, foram utilizadas as mesmas taxas previstas na projeção populacional do IBGE (2019b) por estado, aplicadas à população de 2010 para cada ano até 2050. Finalmente, a população urbana foi calculada como a diferença entre a população rural projetada, e a população total projetada para cada estado. Os valores utilizados podem ser vistos na tabela no Anexo I.

Como grande parte das populações urbanas é atendida por empresas distribuidoras de saneamento BRASIL (2018) foram utilizados os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para a quantificação do uso de água para o setor de abastecimento urbano. Para o cálculo dos coeficientes médios de retirada de água para o abastecimento urbano foi utilizada uma metodologia simplificada da proposta por ANA (2019b). Nas metodologias estudadas o cálculo é feito em base municipal de acordo com faixas de número populacional, contudo, como as projeções populacionais estão na base estadual, foi utilizado um coeficiente médio para a retirada e consumo de água para cada estado conforme as equações abaixo:

$$Uso_{per\ capita} = \left((AG_{010} - AG_{019}) \div AG_{001}\right)$$

$$Perda_{média} = [AG_{006} + AG_{018} - AG_{019}) - AG_{010}] \div (AG_{006} + AG_{018} - AG_{019})$$

$$Retirada_{per\ capita} = Uso_{per\ capita} \div (1 - Perda_{média})$$

$$Consumo_{per\ capita} = Uso_{per\ capita} * (1 - c) + \left(Retirada_{per\ capita} - Uso_{per\ capita}\right) * (1 - c)$$

Tabela 26: Glossário dos indicadores disponibilizados pelo SNIS para estimativa de coeficientes de uso de água

AG001	População total atendida com abastecimento de água	Corresponde à população urbana que é efetivamente atendida com os serviços acrescida de outras populações atendidas

		localizadas em áreas não consideradas urbanas.
AG006	Volume de água produzido (1.000 m³/ano)	Volume anual de água disponível para consumo, medido ou estimado na (s) saída (s) da (s) ETA (s) ou UTS (s). Inclui também o volume de água captada pelo prestador de serviços ou de água bruta importada que seja disponibilizado para consumo sem tratamento, medido na (s) respectiva (s) entrada (s) do sistema de distribuição. Esse volume pode ter parte dele exportada para outro(s) município(s) atendido(s) pelo mesmo prestador de serviços.
AG010	Volume de água consumido (1.000 m³/ano)	corresponde ao volume anual de água consumido por todos os usuários, compreendendo o volume micromedido, o volume de consumo estimado para as ligações desprovidas de hidrômetro ou com hidrômetro parado, acrescido do volume de água tratada exportado para outro prestador de serviços.
AG018	Volume de água tratada importado (1000 m³/ano)	Volume anual de água potável, previamente tratada em ETA (s) ou em UTS (s), recebido de outros agentes fornecedores. Não
AG019	Volume de água tratada exportada (1000 m³/ano)	Volume anual de água potável, previamente tratada em ETA (s) ou em UTS (s), transferido para outros agentes distribuidores. Deve

Fonte: BRASIL (2018b)

A retirada de água considera as perdas médias de distribuição em cada estado, assim como o uso médio de água por habitante em cada estado. No cálculo da média foram desprezados os munícipios cujos valores de uso *per capita* eram inferiores a 70 l/habitante.dia ou superiores a 450 l/habitantes.dia, conforme a metodologia proposta por ANA (2019b). Em média, o índice de atendimento da população urbana foi de 92,5% em 2010, contudo, para aproximação do cálculo, foi considerado que 100% da população urbana é atendida e que as perdas médias não variam com o tempo. Todavia, uma análise mais cuidadosa poderia ser feita, caso fossem estudadas trajetórias distintas ou maior variedade de cenários, por exemplo, em que se estude os impactos do atendimento as metas do ODS 6.

Para o abastecimento rural foram utilizados os coeficientes provenientes da literatura conforme apresentado em (ANA, 2019b, ONS, 2005) e apresentados na tabela abaixo:

Tabela 27: Coeficientes de uso de água para abastecimento rural por estados

UF	***Per capita* (l/hab.dia)**
AL, GO, PI	70
AC, BA, CE, DF, ES, MA, MS, MT,PA, PB, PR, PR, RN, RO, SE, SC, TO	100
AM, AP, MG, RJ, RS, RR, SP	125

Fonte: Elaboração própria baseada em ANA (2019b) e ONS (2005)

Para a determinação das bacias de contribuição para cada estado foi utilizado o balanço de outorgas para UF e ANA utilizando apenas as outorgas de captação superficial.

3.2.4. Quantificação do uso de água para Abastecimento Animal

O nível de detalhamento para a pecuária no modelo BLUES se dá para bovinos, aves e leite. Os coeficientes adotados foram os mesmos que ANA (2019b), em que foi considerado o coeficiente de uso de água para vacas ordenhadas para a produção de leite.

Tabela 28: Coeficientes de uso de água para abastecimento animal

	ONS, 2005	ANA, 2019b (l/cabeça.dia)	
		Retirada	**Consumo**
Bovino	50	50	40
Aves	0,36	0,22 - 0,27	0,132 - 0,183
Vaca Ordenhada		127,5	76,5

Fonte: Elaboração própria baseada em ANA (2019b) e ONS (2005)

O resultado do modelo é dado em kt/cabeça.ano. Portanto para foi necessário fazer uma adequação do coeficiente proposto. Para a conversão foi utilizado o valor médio da produção de carne pelo efetivo dos rebanhos nos anos 2010 e 2015, e de maneira similar para a produção de leite e produção de frango. Considerou-se que essa conversão se manterá constante para os próximos anos.

Tabela 29: Relação entre rebanho efetivo e produção pecuária

	Conversão
Bovino	0,000045 kt/cabeça
Aves	0,000038 kt/cabeça
Leite	0,0017 kt/cabeça

Fonte: Elaboração própria baseado em KÖBERLE (2018)

3.2.4.1. Espacialização da demanda

A espacialização da demanda para pecuária foi feita com base na média da divisão da produção de leite para o cálculo da localização do rebanho de vacas ordenhadas, segundo os dados do IBGE para Pesquisa Agropecuária Municipal (IBGE, 2019c). Para a localização do rebanho bovino, foi utilizada a distribuição relativa entre os estados para cada macrorregião, também baseado na distribuição histórica de acordo com os dados de Abate, no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA) do IBGE. Para todas os três foi assumido que a atual configuração entre as áreas disponíveis e distribuição entre os estados deve se manter parecida.

Para a alocação nas bacias de contribuição foi adotado o mesmo critério que para os outros setores, utilizando-se as informações do balanço de outorga para dessedentação animal.

3.2.1. *Quantificação do uso de água para o setor industrial*

Há uma grande variedade de metodologias propostas para a determinação do uso de água para a Indústria (ANA,2017, ANA, 2019b, NOS, 2005, ONS2003, FUNARBE 2011, BRASIL, 2018) Em todos os estudos acessados é reconhecida a dificuldade para estimar as demandas industriais por questões de sigilo e pouco acesso a informações. Além disso, há uma dificuldade de compatibilização entre indicadores, podendo ser adotado volume de água por unidade produzida, ou por valor adicionado ou número de empregados.

Segundo a Classificação Nacional de Atividade Econômicas (CNAE 2.0) há duas seções para a atividade industrial: Indústrias Extrativas e Indústrias de Transformação. Na análise de usos de água realizada pela ANA (2019b), o usuário consuntivo identificado como “Indústria” refere-se ao uso de água apenas para as Indústrias de Transformação, classificadas conforme a CNAE 2.0. A atividade de mineração, contida dentro da Classe de Indústrias Extrativas é retratada como um outro usuário.

O setor industrial no modelo BLUES foi desenhado para um nível de agregação relevante para a geração de energia, de maneira a permitir uma comparação com o Balanço Energético Nacional. Portanto, não é equivalente a classificação CNAE e não necessariamente representa a configuração mais relevante para o ponto de vista da análise hídrica.

Tabela 30: Classificação do setor industrial no modelo BLUES

Cimento
Cerâmica
Química
Alimentos
Ferro e Aço
Metalurgia
Mineração
Ferro-liga
Papel e Celulose
Têxtil
Outros

Fonte: Elaboração própria

A proposta metodológica deste estudo se difere nesse ponto quanto a classificação dos usuários consuntivos. A ANA define 6 usuários consuntivos, 3 dentre eles estudados de maneira similar neste estudo (Abastecimento Humano, Abastecimento Animal e Agricultura irrigada). Os outros 3 usuários consuntivos são Indústria de Transformação, Mineração e Termoeletricidade. Neste estudo é adotado um setor específico para energia que engloba tanto a Termoeletricidade, quanto a parte da Indústria referente à produção de biocombustíveis, bem como o uso de água para refino de derivados de petróleo com o uso de água de termelétricas e outras fontes geradoras de eletricidade mencionadas na lista de tecnologias. As atividades relativas à extração de carvão mineral e petróleo, que de acordo com a CNAE 2.0, estão classificadas como Indústria extrativa, foram consideradas neste trabalho como parte do setor de energia. Para fins deste estudo, considera-se que o setor industrial é composto por todas as classes da Indústria de Transformação, exceto a referente à produção de biocombustíveis supracitada e a atividade de Mineração. Na Tabela 31 são apresentadas as equivalências entre as classificações adotadas neste estudo, a abordagem utilizada por ANA e a Classificação Nacional das Atividades Econômicas.

Tabela 31: Equivalência entre as classificações de usuários consuntivos entre este estudo e ANA

Este estudo	**ANA**	**Seção CNAE**
Indústria	Indústria Transformação	C-Indústria Transformação
Energia	Indústria Transformação	C-Indústria Transformação
Indústria	Mineração	B-Indústria Extrativa

Energia	Termelétricas	D- Eletricidade e Gás

Fonte: Elaboração própria

Segundo o manual de usuários consuntivos da ANA (2019b) os grupos industriais mais relevantes dentro da Indústria de Transformação são Abate e fabricação de produtos de carne, Fabricação de biocombustíveis, Siderurgia, Fabricação e Refino do açúcar e Celulose e pastas de Fabricação de Papel. No ano de 2017, 40,5% da retirada de água foi destinada para fabricação de alimentos, 13,4% para Celulose e Produtos de Papel e 16,1% para Produtos derivados do petróleo e biocombustíveis. Em relação ao consumo, os produtos derivados do petróleo e biocombustíveis têm uma parcela maior de 25,5%, só ficando atrás dos produtos alimentícios que correspondem a 55,8% do consumo de água da Indústria de Transformação.

O cálculo dos coeficientes para indústria é conservador, uma vez que não considera também diferentes tipos de tecnologia de água de resfriamento, ou implementação de novos processos tecnológicos e possíveis melhorias que poderiam aumentar a eficiência em relação ao uso da água. Segundo a FUNARBE (2011) o uso de faixas é mais adequado do que o uso de médias nos casos em que é possível fazer a associação do processo utilizado na faixa. Contudo, só será possível calcular com mais detalhes e precisão adequando as tecnologias para parte de biocombustíveis, sendo necessário propor também metodologia semelhante prioritariamente para os maiores usuários na indústria, tendo visto fabricação de produtos alimentícios e papel e celulose.

A faixa de extensão dos coeficientes é muito abrangente, e os coeficiente técnicos são específicos para cada tipo de indústria. Não seria possível compatibilizar com as saídas do modelo a projeção da produção de cada uma delas. Portanto, o cálculo foi feito de maneira desagregada, e posteriormente agregado para as classificações do estudo. Funarbe (2011) também fez um levantamento extenso dos coeficientes para o setor industrial, indicando faixas de uso de água por unidade de produção. Ussami (2014) propôs a transformação dos coeficientes da Funarbe (2011) para volume de água por valor de produção. Portanto, para se ter uma referência consistente para projeção da demanda do setor industrial foi utilizado o coeficiente adaptado por valor de produção e não por unidade de produção.

3.3. Apresentação do Estudo de Caso

Para validar o modelo paramétrico, foi selecionado o caso já publicado no artigo *"The threat of the political bargain in Brazil"* (ROCHEDO *et al.*, 2018). Os autores estudaram as interações entre as mudanças de uso do solo e o setor de energia para diferentes cenários de políticas de controle de desmatamento utilizando o modelo de avaliação integrada BLUES. A análise pretendeu mostrar em que medida o enfraquecimento da governança ambiental impactaria o cumprimento das metas climáticas assumidas no âmbito do Acordo de Paris.

Rochedo *et al.* (2018) propõem, portanto, a análise de 3 cenários[25] com restrições de emissões para um orçamento de carbono consistente com um aquecimento global médio de 2°C:

1- Governança Ambiental Forte (SEG);

2- Governança Ambiental Intermediária (IEG);

3- Governança Ambiental Fraca (WEG).

Para fins desta dissertação, foram analisados apenas os cenários (1) e (2), que se referem aos casos com governança forte e intermediária. O modelo não foi capaz de encontrar uma solução viável para o cenário de governança fraca com as tecnologias disponíveis de forma a cumprir com as restrições de orçamento de carbono. Por esta razão, esse cenário não foi considerado[26].

O cenário de governança fraca assume o abandono das políticas de controle atuais bem como um apoio político em prol de práticas agrícolas predatórias (ROCHEDO *et al.*, 2018). O cenário de governança intermediária representa o cenário observado mais provável, em vem ocorrendo até 2030 a tendência de aumento no desmatamento, desde 2013 (ROCHEDO *et al.*, 2018). Nesse cenário as políticas já existentes são mantidas, contudo, há um enfraquecimento da sua efetividade devido ao crescente apoio político a à grilagem de terras, redução da criação de áreas protegidas, restrições orçamentárias

[25] O nome dos cenários foi traduzido livremente pela autora e as siglas referem-se à abreviação do nome originalmente, em inglês.

[26] As variações do cenário de WEG em relação ao cenário IEG não eram representativas, indicando que o cenário IEG estava no limite de saturação das possibilidades tecnológicas de mitigação disponíveis.

como a estabelecida pela proposta de emenda constitucional PEC n°55/2016,[27] durante o Governo Temer e redução de tamanho e degradação de importantes áreas protegidas (ROCHEDO *et al.*, 2018). O cenário de governança forte assume um cenário de expansão mais ostensiva das práticas e maior apoio político ativo na agenda ambiental no país, incluindo incentivos para a conservação de florestas, e comprometimento com a reversão das recentes leis pró-desmatamento (ROCHEDO *et al.*, 2018).

O orçamento total para emissões de CO_2 do Brasil deriva do resultado de diferentes modelos de avaliação integrada globais[28] e estudos internacionais (ROCHEDO *et al.*, 2018). O orçamento estimado dos IAMs é baseado na quantidade acumulada de CO_2 que o Brasil emitiria em um esforço a nível global de mínimo custo para manter o aumento médio da temperatura terrestre abaixo de 2°C até 2100 com probabilidade de 67 a 100%, assumindo uma estratégia de mitigação global (ROCHEDO *et al.*, 2018), como apresentado na Tabela 32. É importante ressaltar que esse orçamento diz respeito apenas às emissões de CO_2. No caso do Brasil, as emissões de outros GEE tem grande relevância, e, portanto, também foram contabilizados no artigo.

Tabela 32: Orçamento de Carbono baseado em ROCHEDO *et al*. (2018)

Ano	**Probabilidade**	**Orçamento de Carbono**
2010 -2050	67% a 100%	24,0 Gt CO_2

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

É importante ressaltar que as políticas induzidas para simular as tendências de mudança de uso do solo somente são aplicadas até 2030, pois caso as taxas de desmatamento adotas fossem mantidas nesse nível até 2050 não seria possível encontrar uma solução para atingir o orçamento de carbono. De 2030 até 2050 o modelo pode escolher livremente as alternativas mais custo-efetivas para cumprir com as restrições climáticas impostas. A análise estendida dessas políticas até 2050 pode ser observada para os cenários SEG e IEG, que levaria a um aumento ainda maior das emissões

[27] Proposta de Emenda à Constituição que altera o Ato das Disposições Constitucionais Transitórias, para instituir o Novo Regime Fiscal, e dá outras providências, também conhecida como PEC do teto dos gastos públicos.

[28] O valor foi calculado como uma média baseado na literatura internacional a partir de um esforço conjunto de IAM integrantes do projeto CD- Links (www.cdlinks.org).

acumuladas relativas ao desmatamento da Amazônia e do Cerrado. No cenário do IEG as emissões alcançariam o valor de 46,5 Gt de CO2, quase dobrando o limite para o período 2010-2050, não sendo compatível, portanto, com o cenário de um mundo de 2°C, como pode ser observado na Figura 30

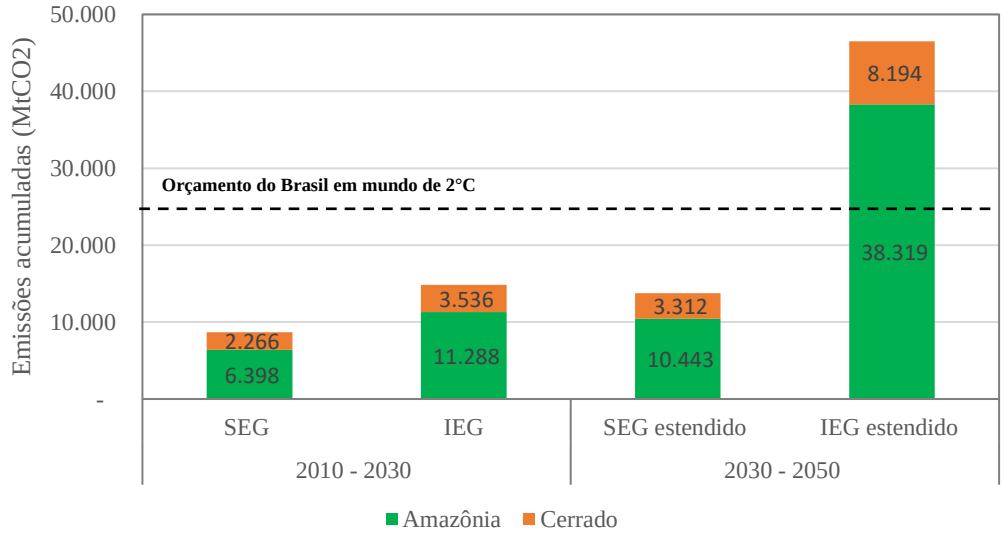


Figura 30: Emissões acumuladas para os cenários SEG, IEG

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

As emissões acumuladas decorrentes do desmatamento em 2050 no setor de uso do solo para o cenário IEG, sem considerar a indução de políticas a partir de 2030, totaliza 16,3 GtCO2, o que limita o orçamento dos outros setores da economia a 7,7 $GtCO_2$, enquanto para o cenário SEG o remanescente para os outros setores soma 14,4 $GtCO_2$.. A maior emissão pelo setor do uso de solo faz com que as emissões precisem ser compensadas em outros setores da economia, em especial no setor de energia, a partir das opções tecnológicas de mitigação disponíveis.

Na Figura 31 é apresentada a trajetória de emissões de GEE para o setor de energia para os dois cenários estudados. É possível perceber que no cenário IEG, a descarbonização do sistema energético ocorre mais rapidamente do que no cenário SEG, atingindo mais cedo níveis mais baixos de emissões de GEE, portanto, o cenário IEG é mais restritivo em relação ao orçamento de carbono. A necessidade energética e as escolhas tecnológicas, portanto, para cada cenário variam. Para atingir o orçamento reduzido, no cenário IEG a partir de 2020, o modelo BLUES opta pela penetração de

veículos elétricos no setor de transportes e a partir de 2030 pelo uso de biocombustíveis avançados. A escolha pela eletrificação da frota de maneira antecipada é apontada pelos autores com a ressalva, de que é pouco provável que ocorra diante do cenário atual no Brasil, em que há ausência de políticas de infraestrutura e políticas de apoio a veículos elétricos (ROCHEDO *et al.*, 2018). Tal medida reduz a demanda de energia para o setor de transportes, uma vez que veículos elétricos são mais eficientes que veículos de combustão interna para o transporte de passageiro (ROCHEDO *et al.*, 2018).

.

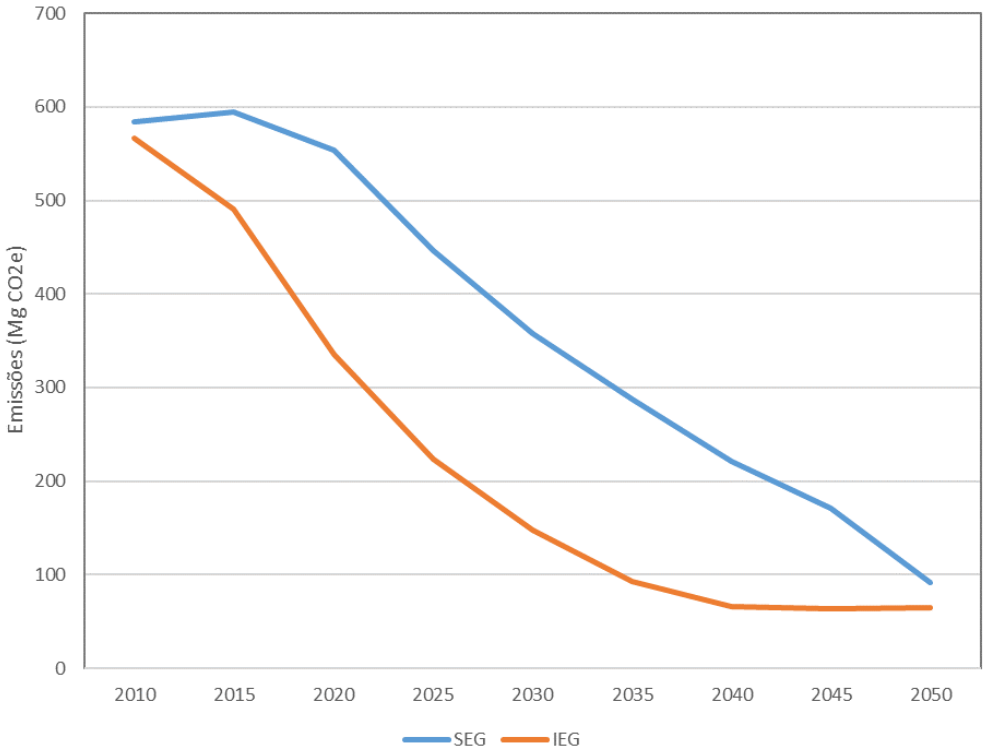


Figura 31: Emissões totais para o setor de energia no período 2010- 2050

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

Na Figura 32 pode ser observada a evolução da composição da matriz de energia primária para cada um dos cenários estudados. O cenário SEG mantém uma maior participação de fontes fósseis em relação ao outro cenário, enquanto no cenário IEG pode ser observado um crescimento expressivo das fontes de biomassa a partir de 2030, como forma de reduzir as emissões no setor de energia. O aumento significativo da componente de bioenergia também é observado no cenário SEG, com grande relevância para os derivados da cana. O bagaço de cana parece ser destinado prioritariamente para geração

de eletricidade, em detrimento da utilização para produção de etanol de segunda geração (ROCHEDO *et al.*, 2018).

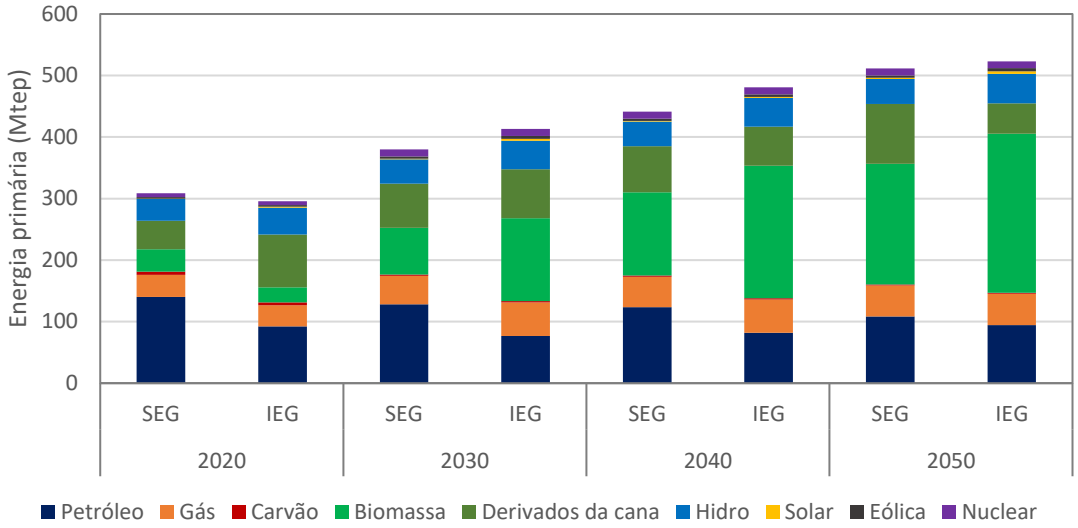


Figura 32: Energia primária para os cenários estudados para 2020, 2030, 2040 e 2050

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

Na Figura 33 pode ser vista a composição da matriz elétrica projetada para cada cenário. O cenário IEG possui uma maior demanda de energia elétrica devido à eletrificação do setor de transportes. Em ambos os cenários, a parcela de energia hidrelétrica decresce ao longo dos anos, ainda que se mantendo relevante na matriz elétrica. Além disso, pode-se ser observado um aumento na relevância das fontes eólica e solar, principalmente para o cenário IEG. No caso da energia solar é previsto um maior aumento de geração distribuída de sistemas fotovoltaicos. A expansão considerável da geração elétrica a partir de bagaço de cana pelo modelo baseia-se na escolha por sistemas mais eficientes desse tipo de geração, que passam a gerar um grande excedente elétrico.

O crescente papel dos biocombustíveis pode ser constatado na Figura 34. Atualmente, a redução das emissões do setor de transporte apoia-se na eletrificação da frota de veículos leves e pesados e no Brasil, em particular, na utilização de biocombustíveis com destaque para o etanol. Para o setor de aviação, contudo a única alternativa tecnológica viável atualmente consiste na utilização dos biocombustíveis avançados, produzidos a partir de biomassa (HEFA, BTL, ATJ e Diesel Verde) (CARVALHO, 2017, TAGOMORI *et al.*, 2018). A escolha antecipada por maior expansão dos combustíveis avançados no cenário IEG é justificada pela maior restrição

nas emissões para o setor de energia. A expansão de infraestrutura para captura, transporte e armazenamento de carbono é limitada pelo seu custo para cada período analisado.

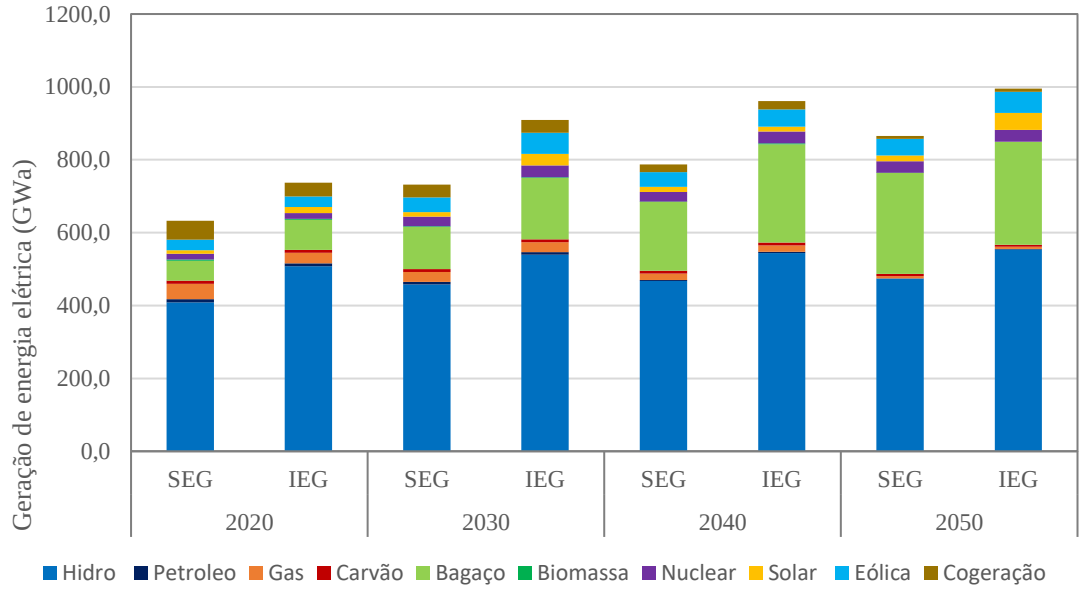


Figura 33: Geração de energia elétrica para os cenários SEG e IEG

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

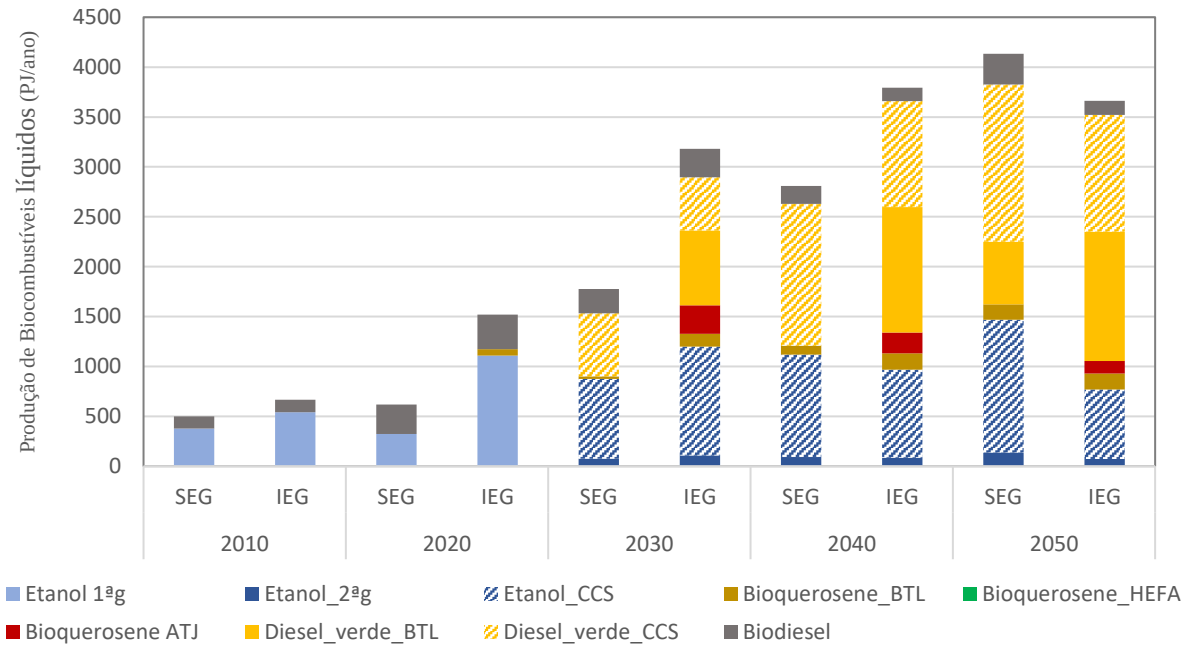


Figura 34: Biocombustíveis para os cenários SEG e IEG de 2010 a 2050

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

No cenário IEG, a componente principal da produção de bicombustíveis líquidos é a tecnologia BTL com ou sem CCS. Para o cenário SEG, pode ser observado um crescimento gradual da relevância da produção, contudo a produção total de biocombustíveis se mantém menor, exceto no ano de 2050. É interessante notar ainda, que neste cenário a produção de etanol com CCS se mantém relevante ao longo de todo período. Na Figura 35 pode ser observado ainda que o uso de bioenergia com CCS (BECCS) é menor no cenário IEG do que no cenário SEG.

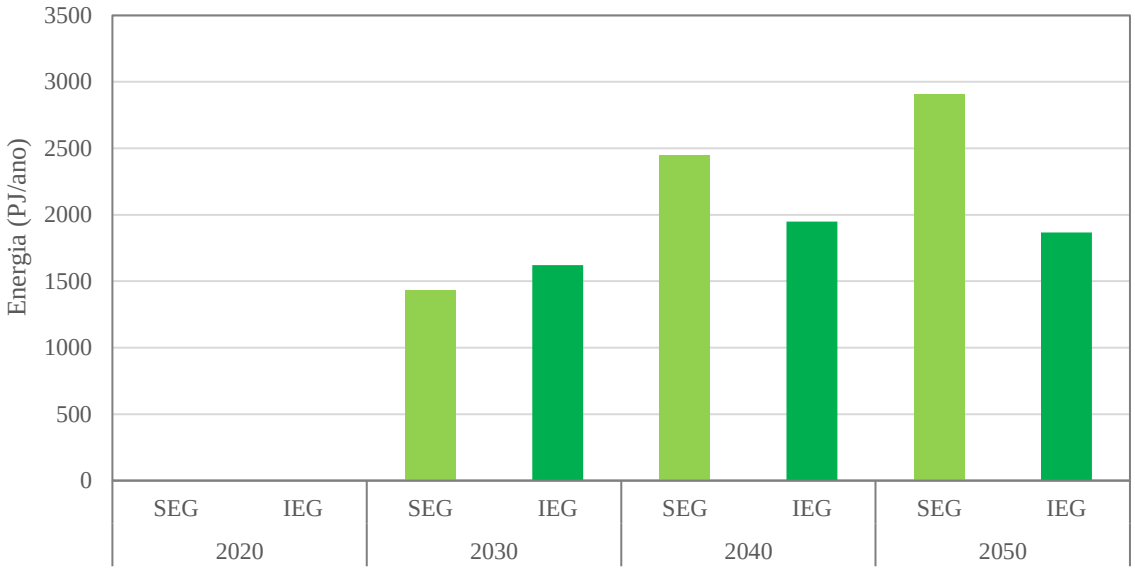


Figura 35: Uso de bioenergia com CCS para os cenários SEG e IEG

Fonte: ROCHEDO *et al.* (2018)

Os autores estimaram ainda a diferença em termos de custo associado para cada um dos cenários. O total dos investimentos necessários e capital para O&M é quase duas vezes superior para o cenário IEG em relação ao cenário SEG como pode ser visto na Tabela 33. Isso demonstra que as opções de mitigação disponíveis para o setor energético são, de fato, mais caras que a mitigação de emissões baseada no desmatamento. Pode ser observado ainda, que a maior parte dos investimentos recai sobre o setor de energia, em especial para o setor de combustíveis líquidos.

Tabela 33: Investimento e Custo de Operação e Manutenção (O&M) para os cenários SEG e IEG

	SEG (10^9 US$_{2010}$)		IEG (10^9 US$_{2010}$)	
	Investimento	O&M	Investimento	O&M
Combustíveis[1]	622	381	1132	418
Setor Elétrico	367	86	641	109
Indústria	48	52	49	65
Outros	164	136	167	137
Total	1.201	655	1.989	729

[1]Esse setor inclui produção de energia primária, refinarias e produção de biocombustíveis e a infraestrutura de CCS

Fonte: adaptado de ROCHEDO *et al.* (2018)

4. Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os compilados dos coeficientes técnicos utilizados para elaboração do modelo técnico-paramétrico, e os resultados obtidos são analisados e discutidos por cada setor de maneira detalhada, observando as interações entre cada um. Finalmente é realizada uma análise do nexo, comparando os diferentes usos nas bacias hidrográficas brasileiras.

4.1. Coeficientes Técnicos

4.1.1. Irrigação

A utilização de coeficientes técnicos por estado permite ter uma noção dos impactos locais associados ao uso da água. Na Tabela 34 é apresentado o conjunto dos coeficientes em m³ por hectare, por ano, calculados com base nos dados da FUNARBE, para as culturas consideradas nesse estudo, de acordo com a metodologia explicitada no capítulo anterior.

Tabela 34: Coeficiente técnico para retirada de água para irrigação por cultura (m³/ha.ano)

UF	Algodão	Arroz	Café	Cana-de-açúcar	Capim Elefante	Feijão	Laranja	Mandioca	Milho	Soja	Trigo
RO	0,00	4.354,64	3.128,14	5.319,32	0,00	1887,07	2.484,46	1.643,75	2.213,03	1503,58	0,00
AC	0,00	3.115,23	2.609,23	4.174,73	0,00	49,15	1.830,96	2.332,78	2.002,98	0,00	0,00
AM	0,00	398,37	1.528,19	2.758,59	0,00	66,48	1.353,80	906,22	72,01	0,00	0,00
RR	0,00	4871,71	0,00	6.353,48	0,00	1643,32	2.505,54	2.635,49	2.884,99	0,00	0,00
PA	0,00	5.419,08	4.184,26	6.395,43	0,00	952,46	3.254,30	1.594,24	3.405,80	2998,61	0,00
AP	0,00	4.097,20	0,00	5.687,52	0,00	2.890,25	2.696,86	1.410,41	1.301,64	0,00	0,00
TO	0,00	9.357,60	0,00	8.295,61	0,00	2.612,36	4.425,61	3.147,32	4.296,61	3762,79	0,00
MA	0,00	7.410,74	0,00	10.691,23	0,00	3.353,32	5.627,76	3.324,95	4.027,06	2941,94	0,00
PI	0,00	11.658,45	0,00	13.904,21	5.146,13	5.134,29	7.057,41	8.041,99	5.740,74	0,00	0,00
CE	9.038,32	13.415,98	9056,30	15.603,10	3.210,07	7.338,32	7.778,02	7.697,56	6.899,67	4551,94	0,00
RN	9.039,85	15.242,80	0,00	16.117,14	2.466,72	8.085,25	11.780,00	6.811,41	7.939,52	2347,12	2979,31
PB	9.444,53	14.825,69	0,00	14.616,91	1.759,11	7.015,98	5.807,73	6.457,32	5.713,01	0,00	1688,74
PE	7.968,70	15.669,04	7881,61	13.508,60	770,51	6.246,21	6.374,97	7.806,49	5.931,99	0,00	0,00
AL	7.102,42	11.809,41	0,00	12.140,56	1.247,98	5.692,41	6.197,87	6.993,28	5.527,93	0,00	0,00

SE	0,00	11.068,67	0,00	11.357,18	0,00	4.609,18	5.515,60	6.127,55	4.915,40	0,00	0,00
BA	6.349,95	9.644,67	5.439,70	10.577,14	969,50	3.322,02	4.357,73	4.542,24	2.402,70	7195,96	0,00
MG	4.562,67	5.782,17	3.683,22	6.576,96	753,19	1.972,27	3.301,66	2.670,45	2.430,19	4.271,18	238,52
ES	0,00	4.799,54	3.527,07	6.544,74	961,54	2.139,15	2.456,95	1.770,12	2.240,51	0,00	0,00
RJ	0,00	9.281,11	2.209,63	3.062,96	296,35	495,67	1.291,86	248,10	902,11	0,00	0,00
SP	1.873,69	3.529,69	2807,72	5.209,93	150,48	1.133,20	2.216,11	1.641,65	1.812,65	1.842,10	367,54
PR	524,18	1.010,24	868,68	2.344,29	6,90	160,32	365,54	474,12	292,64	273,68	172,73
SC	0,00	7.858,38	0,00	1.347,06	0,00	51,60	70,12	1,96	18,76	153,13	164,08
RS	0,00	8.209,07	0,00	2.413,73	4,09	47,64	420,26	4,37	49,73	452,03	0,00
MS	1.156,33	3.920,91	1.707,44	5.623,84	0,00	1.195,92	2.142,54	2.082,86	1.349,66	1.408,55	874,79
MT	3.683,65	5.125,26	3.811,14	6.696,94	0,00	1.946,90	3.228,49	2.853,72	2.185,67	2.965,32	0,00
GO	2.154,3	6.208,26	4.908,09	7.588,46	712,28	3.316,16	3.956,23	3.391,73	3.196,51	4.004,70	662,66
DF	0,00	1.766,15	5.710,87	8.785,51	1729,83	5.121,95	4.820,66	2.203,58	4.208,90	4.329,49	3.982,75

Fonte: Elaboração própria baseada em FUNARBE (2011)

A análise dos coeficientes cana-de-açúcar, cultura importante no contexto do nexo água-energia-uso do solo, por ser uma das fontes mais relevantes para bioenergia, no Brasil, mostra que os coeficientes de irrigação na região do semiárido, que compreende parcialmente os estados do PI, CE, RN, PB, AL, SE, BA, são muito mais elevados, do que nas regiões do sudeste, que se destaca historicamente como maior produtora no país (IBGE, 2017). Essa região é marcada por grandes secas e intermitências dos regimes pluviais, e é uma região que deve ser olhada com a atenção da perspectiva de gestão de recursos hídricos.

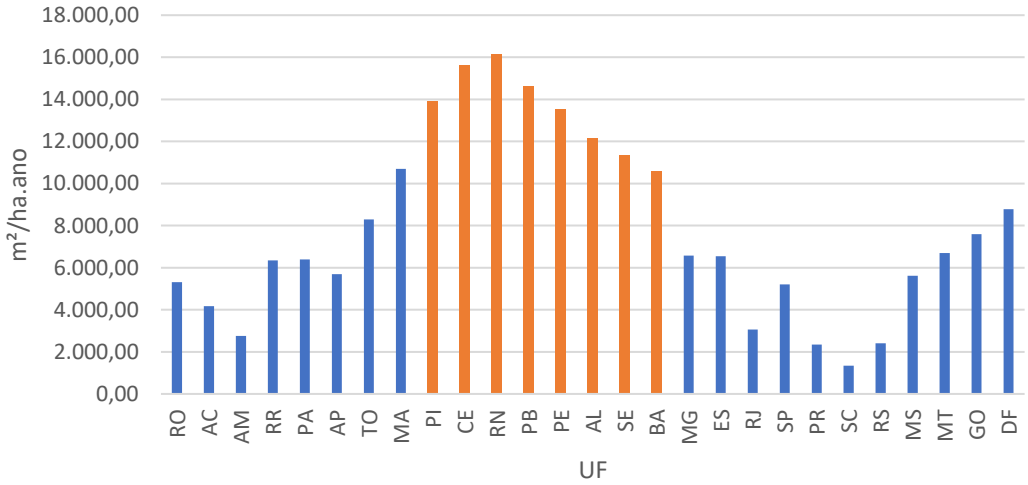


Figura 36: Análise dos coeficientes técnicos para irrigação por estado em m³/ha.ano

4.1.2. Energia

O conjunto dos coeficientes hídricos para o setor energético pode ser visto na Tabela 35 na mesma unidade. A análise dos coeficientes técnicos das tecnologias do setor elétrico, é importante reforçar que para a retirada, os valores dependem fortemente do sistema de resfriamento adotado. A retirada é até aproximadamente 40 a 56 vezes maior para as tecnologias com uso do sistema aberto (OC), enquanto o consumo é 0,5 a 0,8 menor quando comparadas ao sistema de torres de resfriamento (WTC).

Tabela 35: Resumo dos Coeficientes hídricos para o Setor Energético

	Retirada		**Consumo**	
Tipo de Resfriamento	**OC**	**WTC**	**OC**	**WTC**

Tecnologia	Unid				
Térmica Rankine diesel	m³/GJ	33,8	0,7	0,3	0,5
Ciclo Combinado	m³/GJ	14,6	0,3	0,1	0,2
Ciclo Combinado com CCS	m³/GJ	24,1	0,5	0,2	0,3
Térmica Rankine a carvão mineral	m³/GJ	34,6	0,872	0,4	0,5
Térmica Rankine a carvão mineral com CCS	m³/GJ	66,7	1,5	0,8	1
Carvão mineral para IGCC	m³/GJ	19	0,4	0,2	0,3
Carvão mineral para IGCC com CCS	m³/GJ	20,9	0,6	0,4	0,5
Térmica Rankine a biomassa	m³/GJ	33,8	0,7	0,3	0,5
Usina nuclear	m³/GJ	50,6	0,9	0,5	0,7
Solar CSP	m³/GJ	46,7	0,9	0,5	0,7
Solar PV Centralizada	m³/GJ	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Cogeração a Bagaço	m³/GJ	82	2	0,6	1,1
Biodiesel (Transesterificação metanol)	m³/GJ		0,017	0,014	
Biodiesel (Transesterificação etanol)	m³/GJ	3		0,025	
Etanol (usinas anexas antigas c/ CCS)	m³/GJ	0,800		0,895	
Etanol (usinas anexas antigas s/ CCS)	m³/GJ	0,800		0,895	
Etanol (usinas anexas novas s/ CCS)	m³/GJ	0,620		0,737	
Etanol (usinas anexas novas c/ CCS)	m³/GJ	0,620		0,737	
Etanol (usinas autonômas antigas)	m³/GJ	0,216		0,216	
Etanol (Destilação p/ Anidro)	m³/GJ	0,022		0,022	
Etanol 2a geração	m³/GJ	0,361		0,253	
Etanol (usina autonôma c/ CCS)	m³/GJ	0,159		0,159	
Alcohol-to-Jet	m³/GJ	0,040		0,055	
Bioquerosene HEFA	m³/GJ	0,026		0,026	
Bioquerosene BTL	m³/GJ	0,245		0,245	
Green diesel BTL	m³/GJ	0,245		0,245	
Green diesel BTL c/ CCS	m³/GJ	0,245		0,245	
Refinaria de derivado de petróleo	m³/GJ	0,0252		0,008	
Extração Gás Natural (Shale)	m³/GJ	0,0000034		3E-06	

Extração Carvão mineral	m³/GJ	0,05583	0,027

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 37 traz uma comparação entre os coeficientes técnicos de consumo, agregados nas diferentes categorias analisadas. As tecnologias de produção de biocombustíveis e de eletricidade tem os maiores coeficientes técnicos para o consumo. É importante ressaltar que esse coeficiente reflete o consumo de água na etapa de produção da energia, conforme as tecnologias explicitadas na metodologia, e não reflete o consumo de água em todo seu ciclo de vida. Portanto, para os biocombustíveis, ainda há o consumo na etapa de irrigação para crescimento do cultivo energético, que neste trabalho está sendo considerado dentro da água que é utilizada para irrigação de culturas. Outros trabalhos, comparam as tecnologias olhando todo seu ciclo de vida, de forma a analisar mais holisticamente quais tecnologias são mais hidro-intensivas ao longo de toda a cadeia de produção. Contudo, o foco deste trabalho foi diferente, e teve como intuito entender não só o uso de água para o setor de energia, mas de forma mais abrangente como ele interage e compete com os usos de água atribuídos a outros setores.

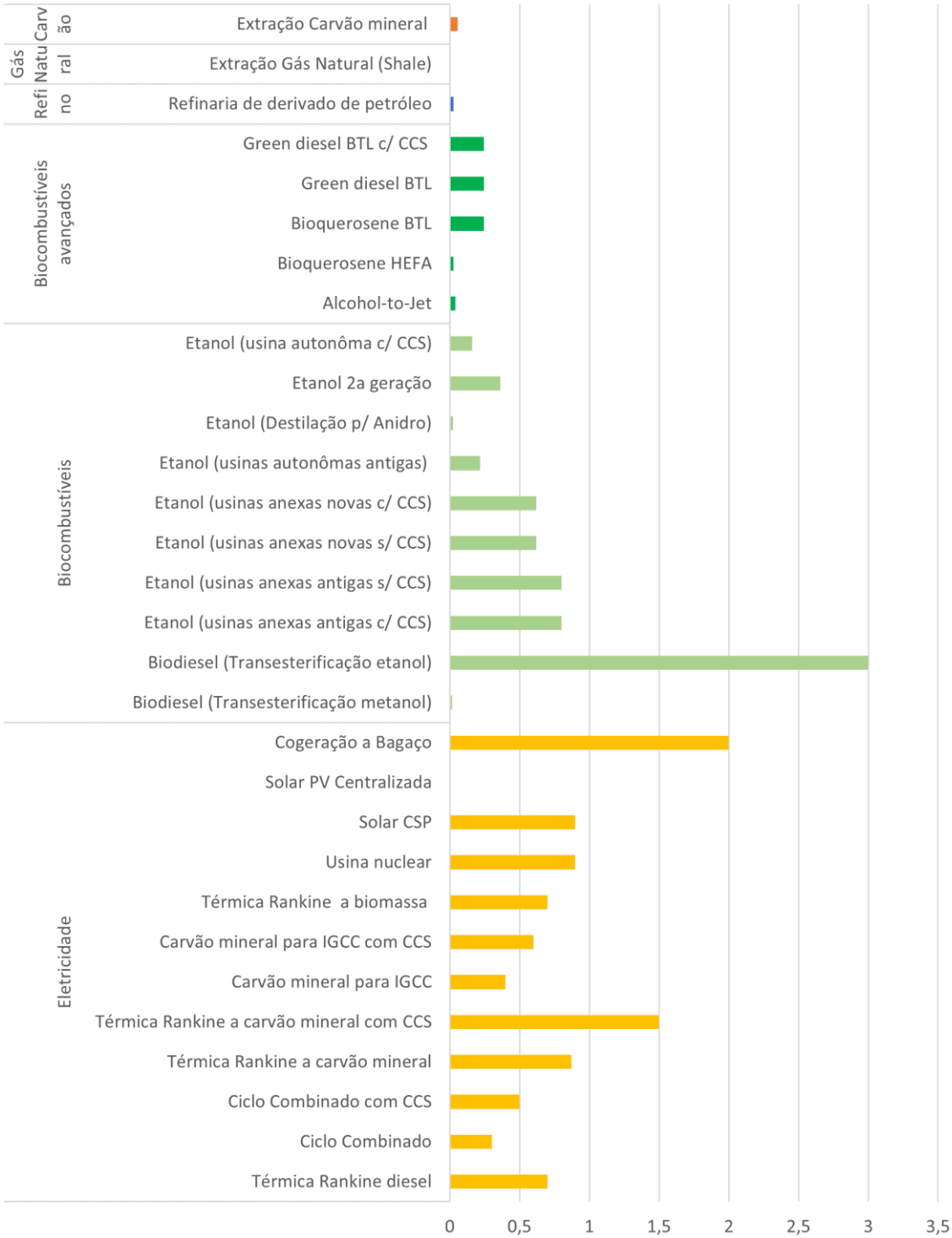


Figura 37: Comparação de coeficientes técnicos para diferentes tecnologias do setor de energia

4.1.3. Abastecimento Humano e Animal

O resultado dos coeficientes médios encontrados para o abastecimento humano para cada uma das unidades federativas pode ser visto na Tabela 36. As diferenças regionais refletem os diferentes índices de perda de água na distribuição, de forma que Rio de Janeiro, Santa Catarina, Amazonas e Ceará possuem os maiores coeficientes de retirada e consumo.

Tabela 36: Coeficientes técnicos para Abastecimento Urbano

UF	Retirada (m^3/s)	Consumo (m^3/s)	Retorno (m^3/s)
RO	233,8	46,8	187,1
AC	176,7	35,3	141,4
AM	311,2	62,2	248,9
RR	303,5	60,7	242,8
PA	206,9	41,4	165,5
AP	212,3	42,5	169,8
TO	245,2	49,0	196,1
MA	253,8	50,8	203,0
PI	197,9	39,6	158,3
CE	310,7	62,1	248,6
RN	227,4	45,5	182,0
PB	238,5	47,7	190,8
PE	304,6	60,9	243,7
AL	220,2	44,0	176,2
SE	208,4	41,7	166,7
BA	239,1	47,8	191,2
MG	259,1	51,8	207,3
ES	211,2	42,2	169,0
RJ	312,6	62,5	250,1
SP	265,2	53,0	212,1
PR	270,8	54,2	216,6
SC	366,5	73,3	293,2
RS	265,7	53,1	212,6
MS	223,9	44,8	179,1
MT	265,4	53,1	212,3
GO	300,6	60,1	240,4
DF	202,2	40,4	161,7

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 37 pode ser visto os coeficientes técnicos utilizados para o modelo. A conversão foi feita de forma a ser compatível com os dados de saída do modelo BLUES, portanto, foi utilizada a conversão cabeças de vacas ordenhadas para a produção de leite, em kt, e no caso de bovinos, de forma similar para refletir a produção de carne bovina, e produção de frango (aves).

Tabela 37: Coeficientes técnicos para o abastecimento animal

	Retirada (m^3/kt.ano)	**Consumo (m^3/kt.ano)**
Bovino	398.072	318.457
Leite	26.878	16.126
Aves	3.458	2.074

4.1.4. Indústria

Na Tabela 38 pode ser visto o compilado dos coeficientes técnicos para diferentes setores industriais, desagregados de forma a fazer correspondência com o modelo BLUES. A mineração possui o maior coeficiente de retirada de água dentre as atividades industriais analisadas. As indústrias de papel e celulose, bem como de aço também tem coeficientes elevados, em comparação com os demais setores, sendo a mineração e produção de aço, atividades energo-intensivas, com alto nível de emissões observada, sendo, portanto, importante analisar também do ponto de vista do uso de recursos hídricos.

Tabela 38: Coeficientes técnicos para o uso de água na indústria em m^3/MMreais

Representação BLUES	**Nível de Desagregação**	**Retirada (m^3/MM reais)**	**Consumo (m^3/MM reais)**
Alimentos e Bebidas	10 Fabricação de produtos alimentícios (exceto abate)	6.344	4.581
Alimentos e Bebidas	10.1 Abate	1.375	172
Alimentos e Bebidas	11 Fabricação de bebidas	1.698	369
Outros	12 Fabricação de produtos do fumo	3.590	718
Têxtil	13 Fabricação de produtos têxteis	6.250	1.131
Têxtil	14 Confecção de artigos do vestuário e acessórios	704	130

Têxtil	15 Preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados	91	17
Outros	16 Fabricação de produtos de madeira	5	1
Papel e Celulose	17 Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	13.083	2.285
Outros	18 Impressão e reprodução de gravações	985	196
Energia	19 Fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis	(não é contabilizado no setor industrial)	
Química	20 Fabricação de produtos químicos	1.705	612
Química	21 Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	7.397	1.479
Química	22 Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	626	124
Cimento	23.2 Cimento	1.177	1.177
Cerâmica	23.4 Cerâmica	1.157	80
Metalurgia	24 Metalurgia (Al e Cu)	985	196
Ferro-gusa	24.1 Ferro gusa	1.674	335
Aço	24.2 e 24.3 Aço	17.395	4.504
Metalurgia	25 Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	315	147
Outros	26 Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	167	33
Outros	27 Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	69	14
Outros	28 Fabricação de máquinas e equipamentos	111	21
Outros	29 Fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias	70	13
Outros	30 Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	224	40
Outros	31 Fabricação de móveis	715	143
Outros	32 Fabricação de produtos diversos	1.096	219
Outros	33 Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0	0
Mineração	07 Minério de Ferro	10.564	5.936

Mineração	07 Extração Minério metálico	1.645	708
Mineração	08 Extração de minerais não metálicos	90.115	5.779

Fonte: Elaboração própria baseada em USSAMI (2014) e IBGE (2009)

4.2. Validação do Modelo técnico paramétrico

Para avaliar os resultados obtidos a partir da quantificação das demandas de água no modelo técnico paramétrico proposto neste estudo, os valores encontrados para os anos de 2010 e 2015 foram comparados com as demandas calculadas por ANA (2009) e ANA (2017a) respectivamente.

As atualizações dos usuários consuntivos ocorrem historicamente nos anos da publicação do Relatório Pleno da Conjuntura Nacional dos Recursos Hídricos. Em ANA (2017a) foi o primeiro relatório em que as Termoelétricas e a Mineração foram retratadas com um usuário consuntivo a parte. Dessa forma para ter uma base de comparação para os dados de energia foram comparadas as demandas encontradas nesse ano com os valores do estudo para o ano de 2015.

É importante ressaltar que as categorias estudadas nesta dissertação diferem dos usuários definidos por ANA (2009) e ANA (2017a). A identificação de um setor de energia, adotado nas análises a seguir, agrega diferentes componentes que estão representados indiretamente em outros usuários, ou não estão sendo representados. Por exemplo, o uso de água para termelétricas, só passa a ser reconhecido pela ANA a partir de 2017 e a água para produção de biocombustíveis está contida dentro da contabilização da tipologia industrial "Produção de derivados do petróleo e biocombustíveis" dentro de "Indústria de Transformação". Por outro lado, o setor industrial está mais agregado na classificação deste estudo. ANA (2017a) considera a mineração como um usuário consuntivo a parte. Para fins de comparação, foi feita uma desagregação dos valores encontrados para mineração, descontando do total do valor encontrado para o setor industrial neste trabalho. O resultado da comparação pode ser visto nas tabelas a seguir.

Tabela 39: Validação dos dados de 2010 com ANA (2009)

Setor)	**Este estudo**	**Este estudo**	**ANA (2009)**	**Variação**

	SEG (m^3/s)	IEG (m^3/s)	(m^3/s)	(%)
Abastecimento Urbano	477,6	477,6	478,8	0,2%
Abastecimento Rural	37,9	37,9	36,8	3%
Abastecimento Animal	129,9	120,2	147,3	-12 a -18%
Irrigação	851,6	943,5	865,5	-2 a 9%
Indústria	153,2	153,2	313,1	-51%
Energia	431,6	491,5	n/a	n/a
TOTAL	**2.081,8**	**2.223,9**	**1.841,5**	13 - 21%

Fonte: Elaboração própria e ANA (2009)

Tabela 40: Comparação dos valores para o ano de 2015 com ANA (2017a)

Setor	Este estudo SEG (m^3/s)	Este estudo IEG (m^3/s)	ANA (2017) (m^3/s)	Variação
Abastecimento Urbano	495,5	495,5	488,3	1%
Abastecimento Rural	37,7	37,7	34	11%
Abastecimento Animal	131,4	123,9	165,1	-20 a -25%
Irrigação	1.113,9	1.592,2	969,0	15 a 64%
Indústria[1]	119,6	119,6	161,6	-26%
Mineração	34,5	34,5	32,8	5%
Energia (Total)	593,1	688,3	247,1	
Termelétrica	127,4	112,8	216,3	-48 a -41%
Outros[2]	465,7	575,5	30,8	n/a
TOTAL	**2.525,7**	**3.091,7**	**2.098**	

[1]Valor para indústria exceto mineração e exceto energia

[2] Este estudo inclui todas as outras tecnologias estudadas, categorizadas em ANA sob a divisão de Indústria (categoria n°19)

Fonte: Elaboração própria e ANA (2017;2019b)

Pode ser visto que os valores calculados pelo modelo alcançaram uma boa representação para os setores de abastecimento humano, com uma melhor representação para o abastecimento urbano.

Para a pecuária, o valor encontrado neste estudo está subestimado, isso era esperado uma vez que apenas o rebanho de bovino, vacas ordenhadas e aves foi contabilizado, diferentemente de ANA (2009) e ANA (2017a), que também consideraram rebanhos suínos e outros animais.

Para o setor de irrigação, adicionalmente foi feita uma comparação da área irrigada total indicada pelo Atlas de Irrigação com os valores de 2015 (ANA, 2017c). O valor total está coerente com os valores reportados, sobretudo para as culturas de cana-de-açúcar, soja e arroz inundado. A representação do setor de agricultura no nível de detalhamento por cultura irrigada deve ser observada com cautela, uma vez que as projeções do modelo não consideraram diferentes produtividades nas regiões e estados estudados. Ainda assim, os valores parecem ser bons indicativos de maneira global para a demanda de água para irrigação.

Tabela 41: Comparação da área irrigada efetiva

(ANA, 2017c)	**SEG (Mha) 2015**	**IEG(Mha) 2015**
6,95	6,86	8,47

Fonte: Elaboração própria

Para o setor de energia, os valores encontrados para Termelétrica os valores estão um pouco subestimados em relação aos valores reportados por ANA (2017a). Para a comparação da diferença dos valores encontrados para energia foi confrontado a parcela relativa ao Grupo 19 do Indústria de Transformação "Fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e biocombustíveis". O valor calculado neste trabalho foi muito superior ao reportado por ANA (2017a). Isso principalmente à maior abrangência das tecnologias consideradas para o setor energético. A fabricação de biocombustíveis, segundo a classificação CNAE, engloba apenas a fabricação de álcool e de biodiesel, enquanto neste trabalho foram avaliadas também a produção de biocombustíveis avançados, cogeração a partir de bagaço de cana-de-açúcar, além da energia primária associada a extração de petróleo, gás e carvão.

4.3. Análise do Estudo de Caso

4.3.1. Água para Irrigação

O uso de água para irrigação apresenta um crescimento expressivo em ambos os cenários estudados de 3,6 a 5,4 vezes maior em 2050 em relação a 2010, conforme mostra a Figura 38. Apesar das variações significativas em todo o período observado, a diferença do acumulado de água retirada para os dois cenários é menor que 1%.

Na Figura 39 pode ser visto o aumento da área irrigada efetiva no Brasil, que alcança o valor máximo de 17,5 Mha, excedendo o potencial de expansão efetivo de 11,2 Mha calculado por ANA (2017c) e também a área potencial de 12,3 Mha para a expansão da agricultura sustentável estimado por FAO (2017). Isso indica que para ambos os cenários, uma parcela da expansão da cultura irrigada, provavelmente se dará em áreas com pior aptidão em termos de solo – relevo, ou desrespeitando algum dos critérios adotados para seleção de áreas compatíveis com a agricultura sustentável.

Para o período 2010 – 2030, quando as políticas de indução de mudança de uso do solo são adotadas, pode-se perceber que há uma maior área irrigada, e consequentemente, uma maior demanda de água para irrigação para o cenário IEG (Figura 38). Esse cenário considera um maior índice de desmatamento, em áreas originalmente do bioma do Cerrado e da Amazônia, que são convertidos para outras finalidades, dentre elas o cultivo agrícola ou a pastagem. A área plantada projetada pelo modelo BLUES para o cenário com desmatamento é consideravelmente maior, atingindo valores de 1,3 a 2,4 vezes superiores para a área plantada projetada para o cenário sem desmatamento entre os anos de 2015 e 2030, o que justifica neste período a maior expansão de culturas irrigadas e uma maior demanda pelo uso de água.

No período de 2035 – 2050, o comportamento é invertido, e o maior uso de água é destinado para o cenário SEG, o que pode ser justificado pelo maior emprego de BECCS nesse período, como exposto na Figura 35. Em especial, a maior expansão de etanol com CCS para o cenário SEG quando comparada com o cenário IEG (ver Figura 34) aumenta a necessidade de cana-de-açúcar irrigada para sua produção.

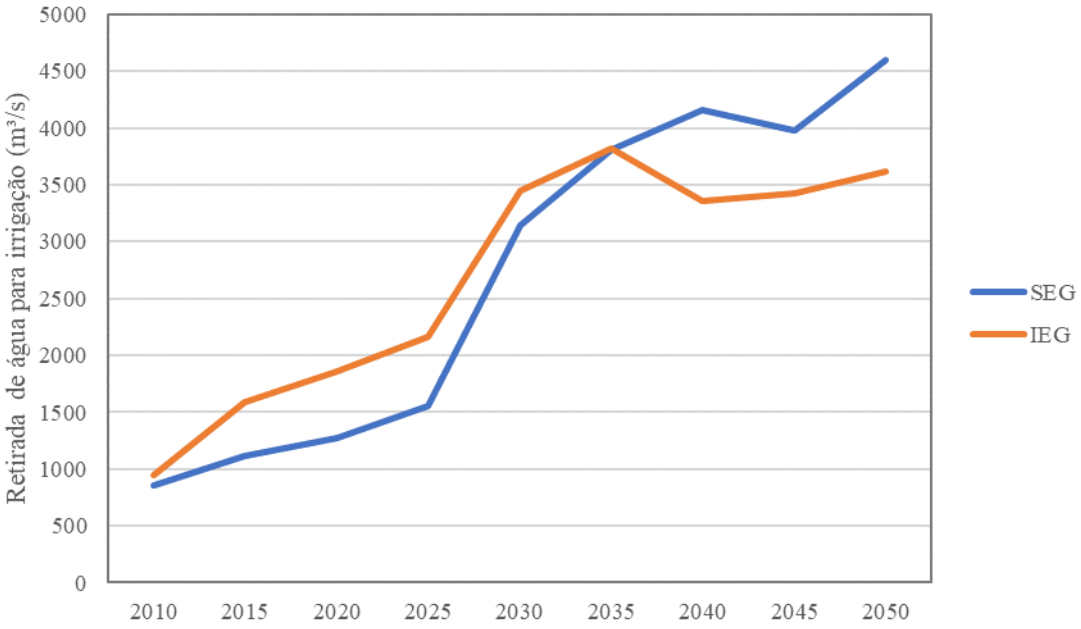


Figura 38: Evolução da retirada de água para irrigação 2010 - 2050

.

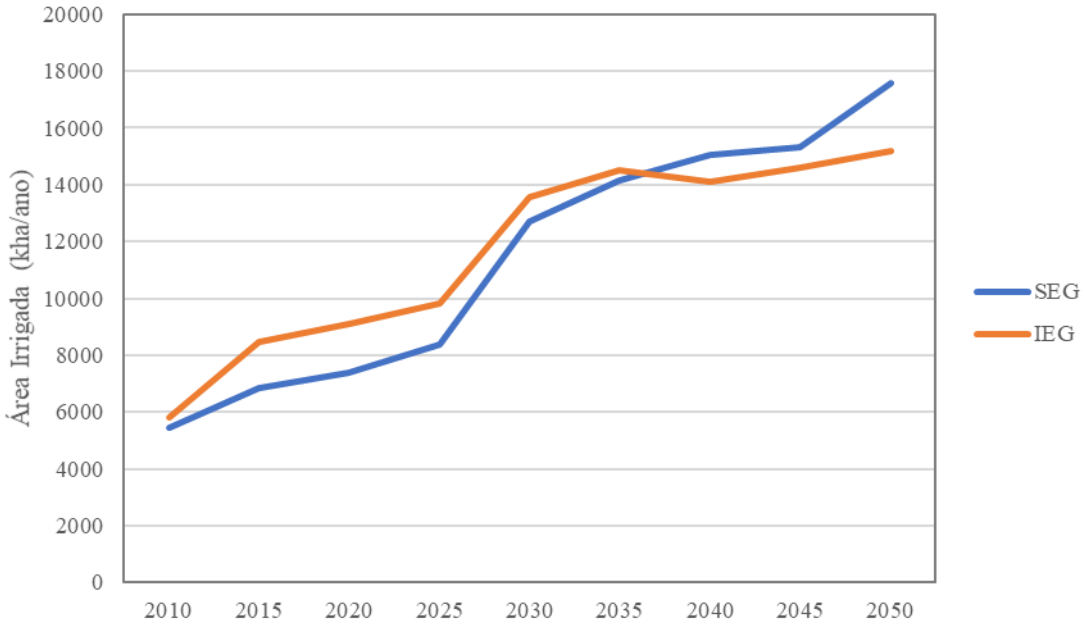


Figura 39: Aumento da área irrigada 2010 - 2050

Na Figura 40 pode ser visto que a principal cultura irrigada entre 2010 e 2050 é a cana-de-açúcar, seguida pelo arroz e a soja. Á área irrigada resultante para 2030 apenas para a plantação de cana-de-açúcar foi calculada em 6,6 e 7,6 milhões de hectares para os cenários SEG e IEG, respectivamente. O valor projetado para 2030 por ANA (2017c) foi

de 2,7 milhões de hectares, mostrando que para atender a demanda de bioenergia, espera-se um valor superior a este para a produção desse cultivo. Pode ser confirmada a tendência observada de substituição de cultura "*rainfed"* que não prescinde de irrigação devido ao volume de chuvas, por culturas onde há necessidade de irrigação. O estudo de ARAUJO, 2020 também apontou uma expansão na cana irrigada em todas as regiões do Brasil tanto no médio quanto no longo prazo, e em especial na região do semiárido, devido a um maior produtividade.

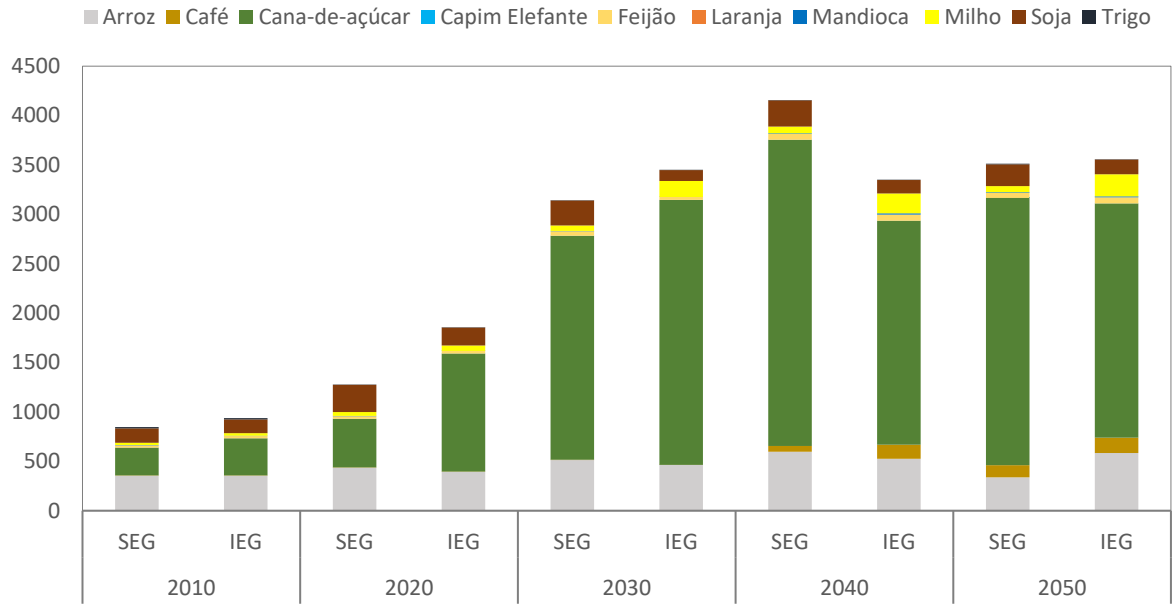


Figura 40: Água para irrigação por cultura e por cenário 2010 – 2050

Fonte: Elaboração própria

A magnitude do aumento do uso de água observada deve ser vista com cautela, uma vez que as projeções da expansão das culturas nas macrorregiões brasileiras não levam em consideração critérios de restrição hídrica ou de produtividade agrícola nem a necessidade de irrigação. No cenário SEG, o modelo BLUES no estudo de ROCHEDO *et al.* (2018) optou por migrar a produção de cana-de-açúcar da região Sudeste para a região Nordeste, o que na prática não seria viável, considerando-se as restrições hídricas, acarretando uma provável superestimativa dos valores de água para irrigação.

Há uma área significativa para expansão da cana-de-açúcar no Nordeste, em especial em Alagoas, segundo (ANA, 2017c), totalizando 0,3 Mha para região Nordeste. Enquanto isso, só para o estado de Minas Gerais, é projetada uma expansão de 0,34 Mha e 0,74Mha para o estado de São Paulo (ANA, 2017c), que coincide atualmente também com a maior parte das usinas sucroalcoleiras. Todavia, há um *trade-off* importante entre

a irrigação e os ganhos de produtividade que não podem ser desprezados. Ainda que a cana-de-açúcar fosse alocada novamente para o Sudeste, poderia utilizar tecnologias de alta produtividade, com maior necessidade de área irrigada o que não necessariamente resultaria em uma menor demanda de água. Essa discussão foi feita por ANGELKORTE (2019) que incorporou no modelo BLUES tecnologias distintas para a produtividade associadas com necessidades de irrigação distintas.

A partir de 2040, a água para cultura irrigada do café passa a aparecer em ambos os cenários. Isso ocorre porque, novamente, o modelo aloca a produção de café na região nordeste, onde há uma maior necessidade hídrica de irrigação. Portanto, é importante ressaltar que modelo técnico paramétrico proposto nesse estudo, não faz a alocação entre as macrorregiões e sim pelos estados a partir dos dados da projeção do modelo integrado. As escolhas para alocação das culturas entre as regiões no modelo BLUES são feitas conforme critérios de minimização de custos, associados a escolha tecnológica e produtividade. O modelo escolhe entre diferentes tipos de solos, que têm custos atribuídos de acordo com critérios pré-estabelecidos associados a proximidade do centro consumidor e a produtividade média daquela cultura em determinada região. O estudo feito por ANGELKORTE (2019) posteriormente refinou os critérios, definindo níveis diferentes de produtividades entre baixa, média e alta, atribuindo custos associados à diferentes sistemas de irrigação e uso de fertilizantes. Como a quantificação do uso de água foi feito a partir de coeficientes de irrigação estaduais, a espacialização impacta diretamente no valor final, portanto, cada configuração da distribuição dos cultivos implica em um uso de água total distinto.

Outro ponto importante a ser considerado na avaliação da alocação de cultivos bioenergéticos, em especial, a cana-de-açúcar que se mostrou altamente relevante é a proximidade com o centro consumidor e às usinas de geração de etanol.

Finalmente, os resultados dão fortes indicativos de que a expansão o uso da cana-de-açúcar para finalidade energética resultará em uma expansão significativa da área irrigada para esse cultivo e, portanto, uma maior retirada e consumo de água para irrigação no setor agrícola. Fica evidente também, que é fundamental a escolha da melhor região para plantio, levando em consideração, não apenas as condições edafoclimáticas e custos associados, mas também as restrições hídricas.

4.3.1. Água para Energia

A retirada de água para energia para os dois cenários analisados pode ser vista na Figura 41. A retirada de água para o setor IEG é maior em todo o período analisado. Na Seção 3.3, os gráficos relativos à produção de energia, incluindo tanto a eletricidade, quanto os biocombustíveis líquidos apontavam para uma maior demanda de energia no cenário IEG justificando, portanto, também a maior demanda de água para esse cenário. Portanto, a restrição de emissões para o setor energético causado pelo aumento das emissões provenientes das mudanças de uso do solo, impulsionadas pelo desmatamento, pressionam o setor energético, que aumenta também a sua demanda por água.

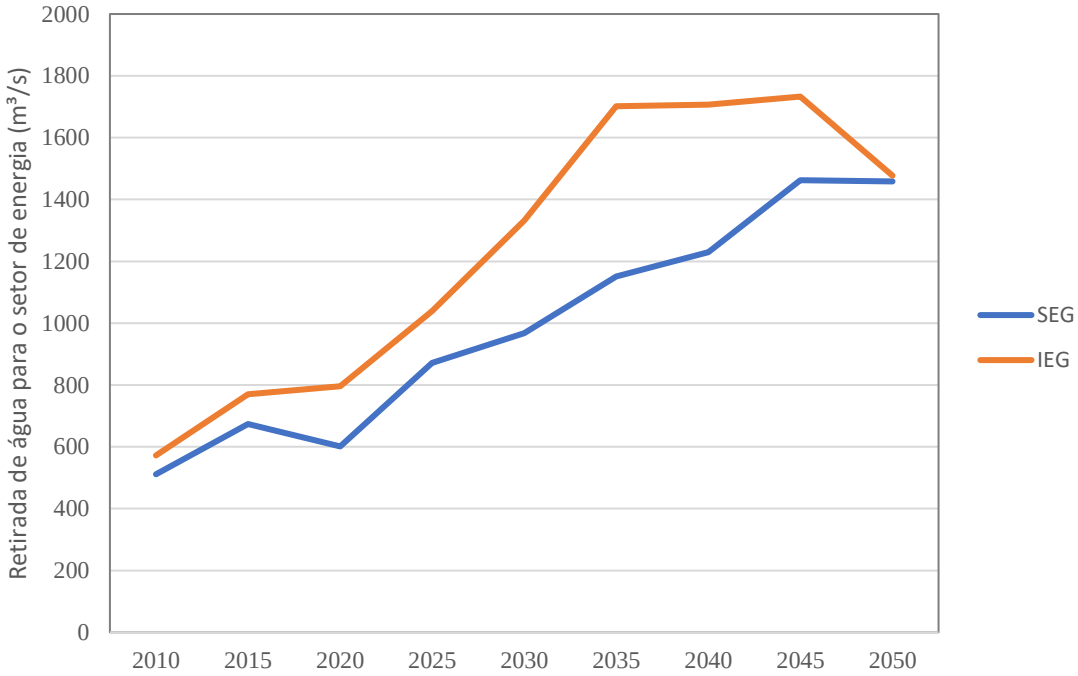


Figura 41: Retirada de água para o setor de energia por cenário 2010 -2050

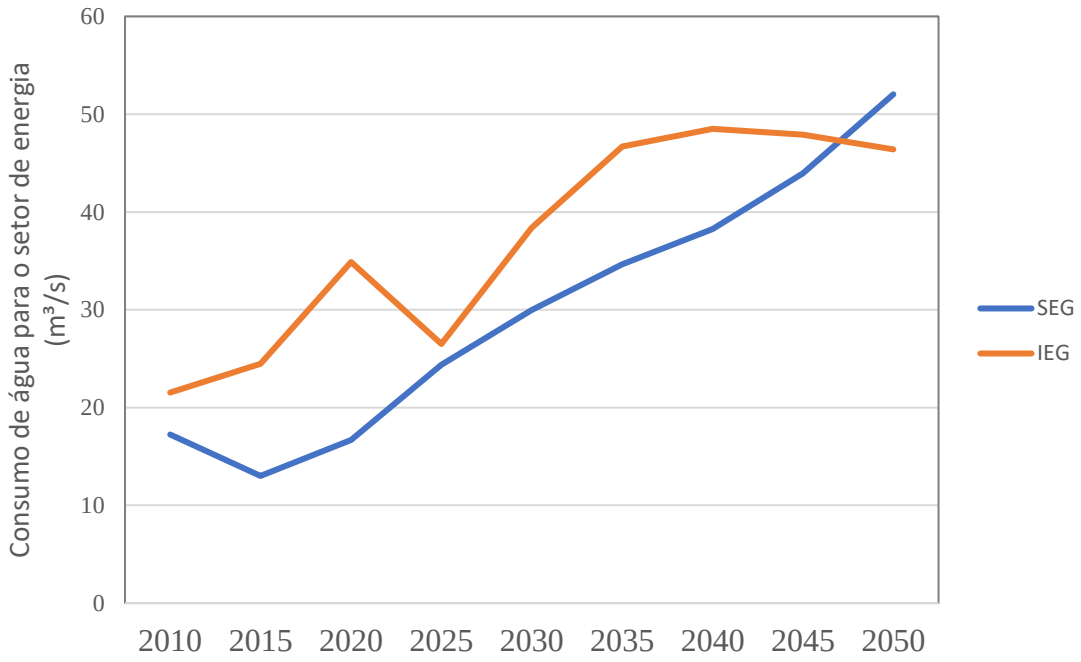


Figura 42: Consumo de água para o setor de energia por cenário 2010-2050

A partir da comparação entre os valores de retirada e o consumo nota-se que a o setor de energia requer um volume até em média 30 vezes maior de retirada do que seu consumo. Isso se dá devido a crescente participação da cogeração a bagaço da cana-açúcar na matriz elétrica. Essa tecnologia, assim como a maioria das usinas termoelétricas utiliza o sistema de resfriamento do tipo aberto (OC), o que incorre em maiores valores de retirada e baixo consumo.

Na Figura 42 é possível observar o comportamento para o consumo de água, que também se mantém mais elevado para o cenário IEG ao longo de todo período estudado, exceto pelo ano de 2050. Isso pode ser explicado ao analisar com mais cuidado para as opções de mitigação que são escolhidas para o setor energético em cada período para cada um dos cenários.

Na Figura 43 nota-se que a maior retirada de água se dá pela escolha da opção tecnológica de cogeração a bagaço. O modelo passa a escolher sistemas de cogeração a bagaço mais eficientes, resultando em significativos excedentes de energia elétrica de fontes renováveis. Ao se observar o consumo de água, na Figura 44, outras opções tecnológicas tornam-se mais relevantes, em especial os biocombustíveis, etanol e bioquerosene.

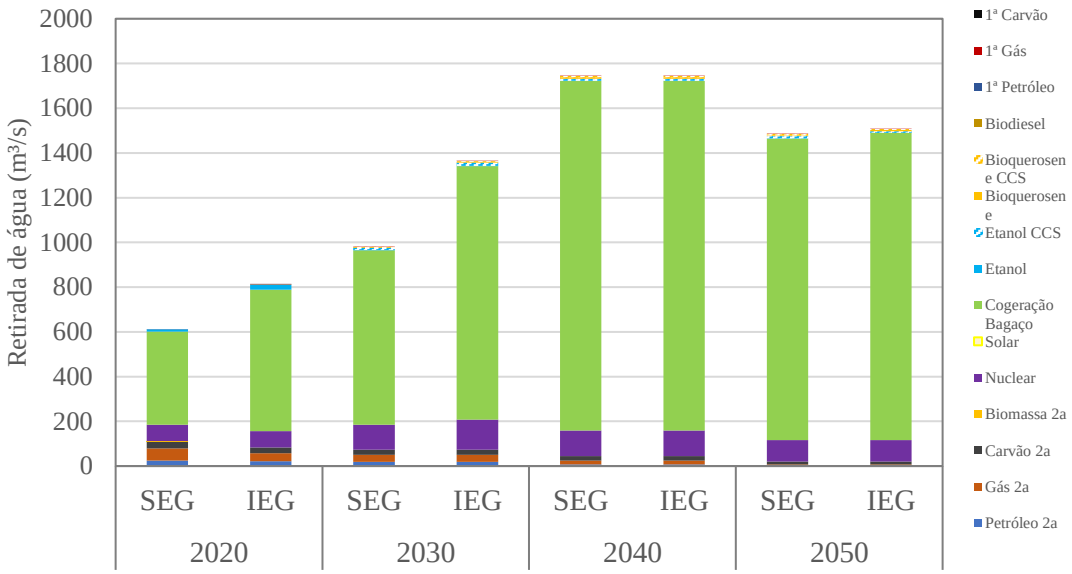


Figura 43: Retirada de água por opção de mitigação no setor energético

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 44 é possível observar que grande parte do consumo de água, por sua vez, passa estar associada com a bioenergia com CCS. A água consumida pela tecnologia de geração a bagaço também é relevante, seguida da água consumida para produção de etanol.

A energia nuclear está representada a nível de comparação da magnitude da sua retirada, contudo, para as análises das bacias de contribuição elas não são consideradas, pois nas usinas instaladas atualmente e previstas para entrarem em operação, é utilizada água do mar.

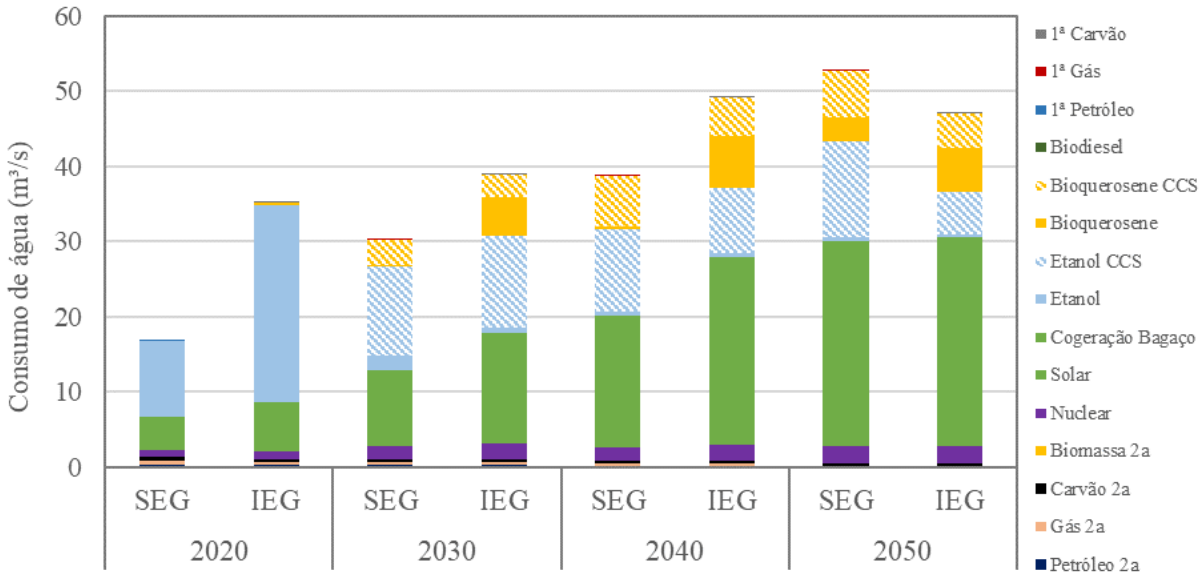


Figura 44: Consumo de água por opção de mitigação para o setor energético

Fonte: Elaboração própria

A análise das opções tecnológicas mostrou que a cogeração a bagaço e a bioenergia, com ênfase nos biocombustíveis avançados são os maiores responsáveis pela retirada e consumo de água superficial. Outro ponto interessante é que a eletrificação do setor de transporte, acarreta não só ~~em~~ uma maior necessidade de energia elétrica mas também pode ter repercussões sobre os recursos hídricos e o uso do solo, uma vez que a expansão do setor elétrico ocorra, conforme projetado, fortemente a partir do uso da tecnologia de cogeração ~~de~~ a bagaço. O crescimento dos biocombustíveis avançados é um ponto de atenção pois acarretam um significativo consumo de água, que pode ser importante localmente.

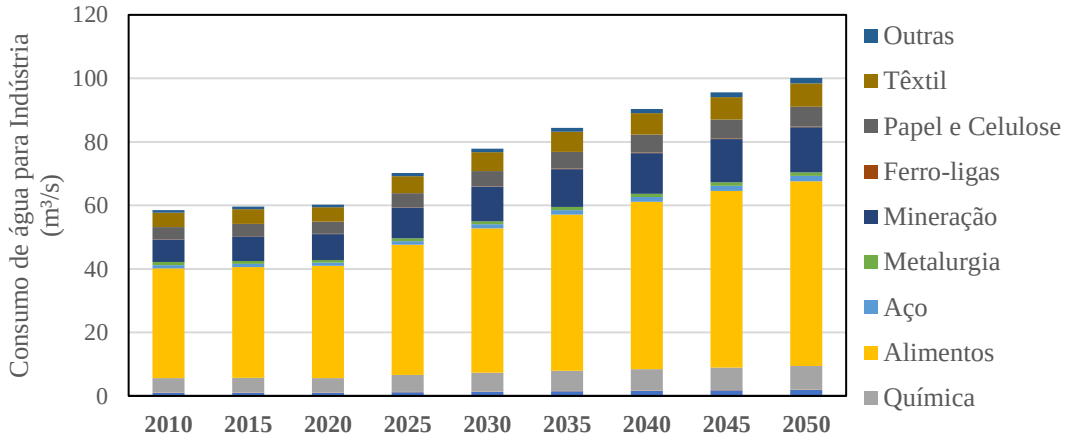
A relevância do uso de água para bioenergia faz com que a escolha da localização das demandas por energia passe a ser especialmente relevante. A expansão deve ocorrer primordialmente, conforme considerado neste estudo, nas regiões em que há disponibilidade de da biomassa utilizada em larga escala. Esse é um ponto de atenção, pois implica que em uma mesma bacia devem ter usos significativos tanto para retirada de água para bioenergia, quanto para a irrigação da cultura para essa finalidade energética, podendo potencialmente gerar situações de conflito. Outros critérios também devem ser observados para localização das usinas sucroalcooleiras, como a proximidade dos centros consumidores e outros critérios de infraestrutura, em especial, devido ao emprego da tecnologia de etanol com CCS.

Para os biocombustíveis avançados, podem ser propostos melhores critérios que visem otimizar o tipo, custo e a disponibilidade de matéria-prima. Assim como o caso do etanol com

CCS, a localização da tecnologia de produção de bioquerosene via BTL com CCS deve observar a necessidade de criação de infraestrutura para captura de carbono, uma vez que há grandes desafios para a implantação de uma rede de transporte de CO2 no país, principalmente como resultado da sazonalidade associada à indústria da cana e consequente ociosidade observada na infraestrutura de transporte de carbono (TAGOMORI *et al.*, 2018).

4.3.2. Água para Indústria

A evolução da retirada e do consumo de água para indústria pode ser observado nas Figura 45 e Figura 46



respectivamente. Coerentemente com o reportado em ANA (2019b), as tipologias industriais responsáveis pela maior retirada de água a produção de alimentos e a produção de papel e celulose. Conforme explicado na metodologia, a produção de derivados do petróleo e biocombustíveis, que está dentro da classificação da Indústria de Transformação, de acordo com a CNAE, neste estudo, está retratada no setor de energia.

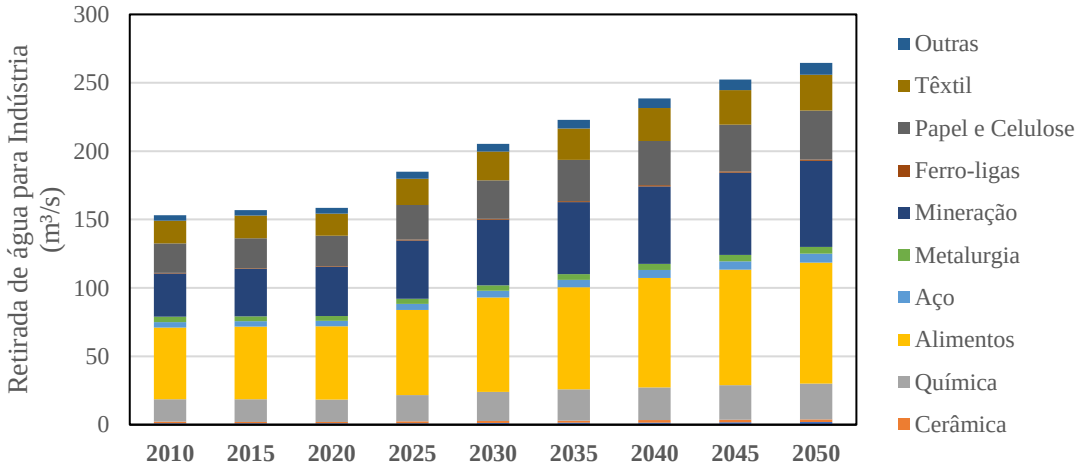


Figura 45: Retirada de água para indústria por categoria 2010 - 2050

Fonte: Elaboração própria

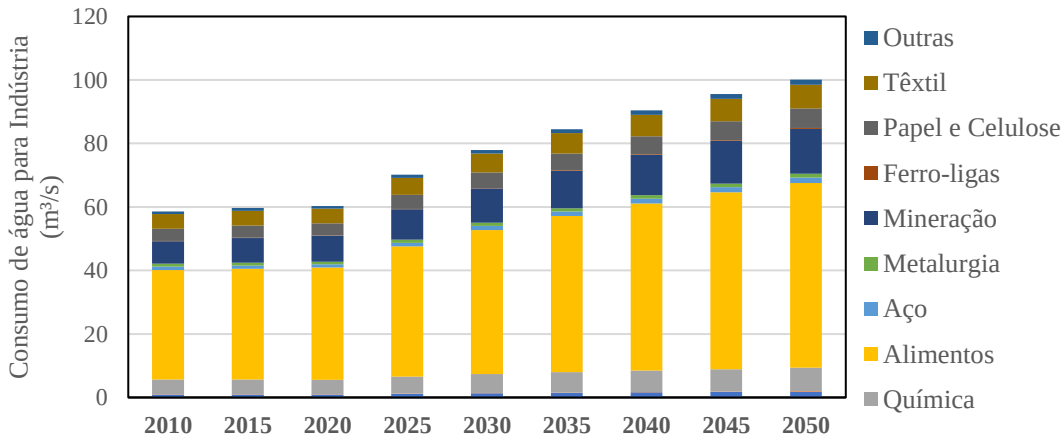


Figura 46: Consumo de água na Indústria por categoria 2010 -2050

Fonte: Elaboração própria

É importante ressaltar que não é considerada uma variação dos coeficientes de água no período 2010-2050, e, portanto, o impacto das opções de mitigação para as diferentes tipologias industriais não está retratado nesse resultado. Além disso, como a demanda industrial é calculada de maneira exógena, as transformações na Indústria com objetivo de redução de emissões, não são consideradas aqui de forma comparativa entre cenários climáticos. A restrição de emissões para o setor industrial e energético, pode levar a escolhas tecnológicas nos setores industriais estudados, porém não contemplados aqui.

O modelo BLUES considera opções tecnológicas para as categorias apresentadas anteriormente, de forma, a otimizar os requerimentos energéticos e as emissões de GEE associadas à indústria que podem ter implicações positivas ou negativas para água. Além de medidas com finalidade energética, também podem ser implementadas políticas de

melhoria de gestão de água na Indústria, como por exemplo, o reuso de água ou ainda a escolha por outras tecnologias de resfriamento, acarretando uma redução do uso de água, que também não foram captados nessa análise. A avaliação dessas medidas exige um esforço adicional considerável, que não estava no escopo deste estudo.

A distribuição espacial da retirada de água para Indústria pode ser vista na Figura 47 e na Figura 48. Como foi assumido a hipótese de que não haveria uma variação significativa na localização dos *clusters* industriais, a distribuição de água entre os estados segue a mesma lógica atual. É possível notar, que a retirada de água para o estado de São Paulo é muito superior aos outros estados. Em 2050 a retirada de água para esse estado pode crescer até 3 vezes, caso a configuração atual seja mantida. Nesse estado predominam as tipologias industriais de produtos químicos, siderurgia e "outros".

Nos estados de Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul e pode-se perceber que há um aumento da retirada de água para o setor industrial, o que faz com que em 2050, estejam na mesma faixa de intensidade que o estado de São Paulo está atualmente. Em Minas Gerais, a retirada em 2050 é majoritariamente destinada para a mineração (46%) e para o setor de alimentos (28%). Nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul, as principais tipologias industriais são a produção de alimentos e bebidas, 44% e 46% respectivamente. Destaca-se ainda a retirada de água para indústria de papel e celulose no Paraná.

No Pará, a intensificação da retirada é liderada pelo crescimento do setor de mineração, que representa 73% da retirada de água nesse estado em 2050. Na Bahia predominam as tipologias de produção de alimentos, papel e celulose e metalurgia

enquanto em Goiás a maior parte da retirada de água é destinada para produção de alimentos.

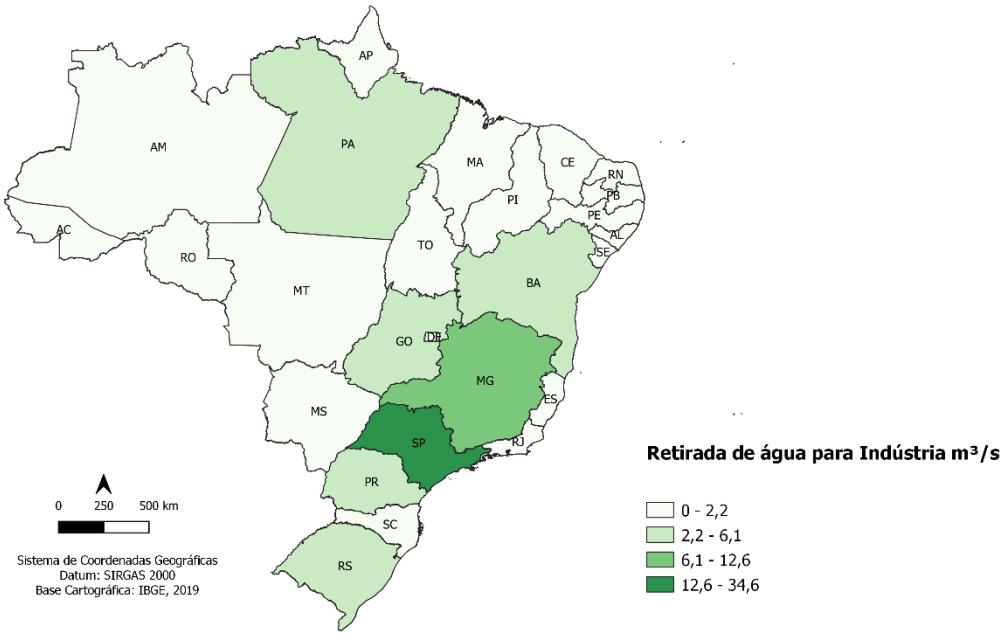


Figura 47:Distribuição espacial da demanda de água para indústria em 2010

Fonte: Elaboração própria

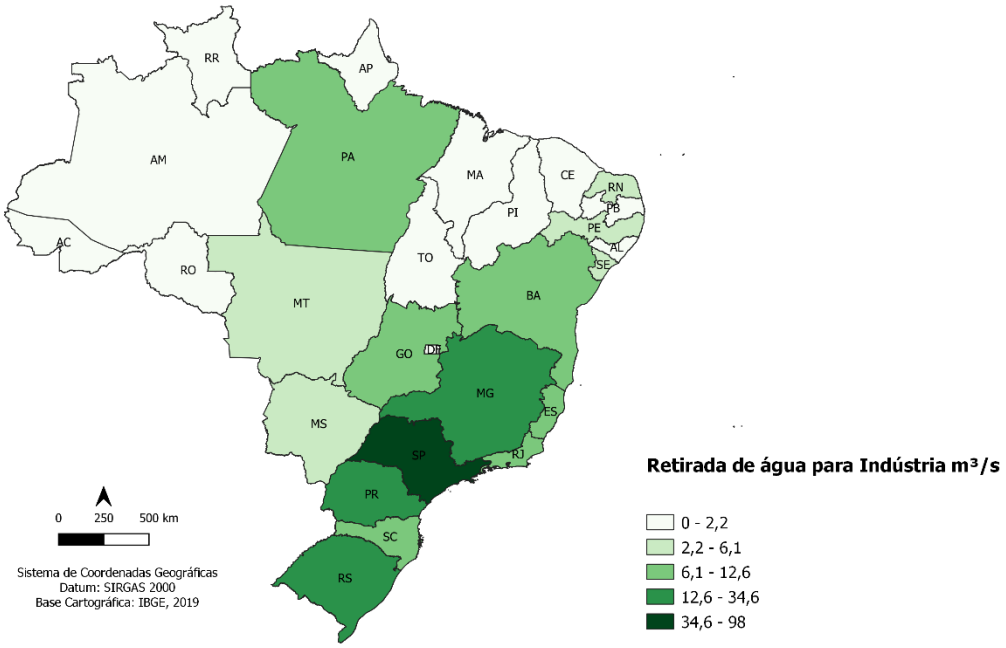


Figura 48: Retirada de água para indústria por estado em 2050

Fonte: Elaboração própria

4.3.3. Água para Abastecimento Humano e Animal

A garantia do uso prioritário de água para o abastecimento humano está prevista pela Política Nacional de Recursos Hídricos em situações de escassez. Este ponto é sensível, da perspectiva de vista de conflito pelo uso de água, uma vez que a configuração atual em grandes centros urbanos aumenta a pressão local sobre as bacias hidrográficas. Portanto, a projeção da população foi feita de maneira cuidadosa de forma a representar as populações urbanas nos diferentes estados brasileiros.

A Figura 49 mostra a evolução da retirada de água para o abastecimento urbano e rural. Pode-se observar, conforme, explicitado na metodologia uma redução da retirada para abastecimento rural, como resultado da maior urbanização do país.

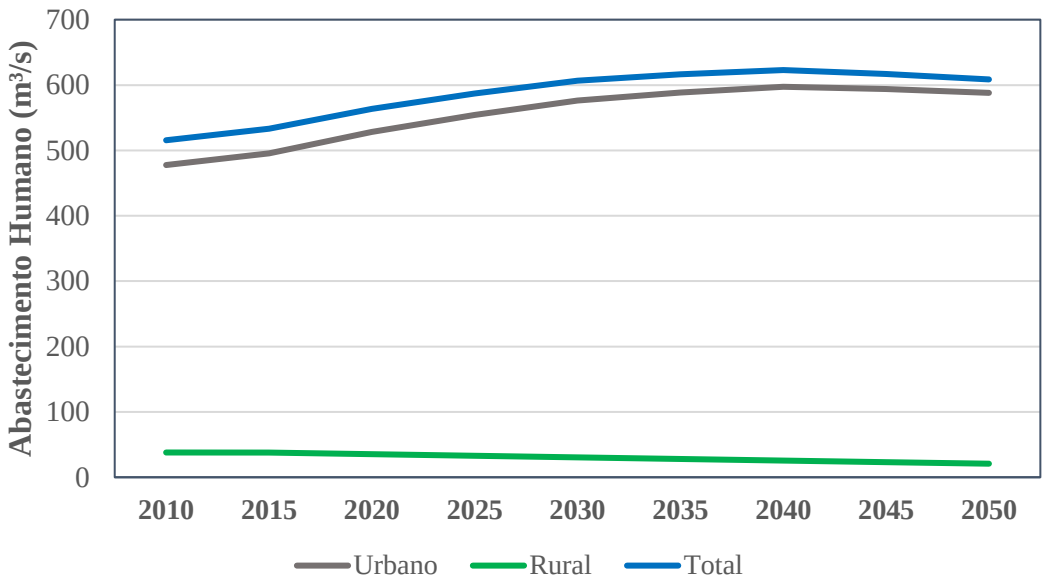


Figura 49: Retirada de Água para Abastecimento Urbano e Rural 2010 – 2050

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 50 são comparadas a vazões de retirada e consumo para abastecimento humano no ano de 2050. A contabilização do abastecimento de água para o abastecimento humano foi feita de maneira exógena, e considerando na população consistente com a narrativa do SSP2, portanto, é razoável afirmar que não há alterações entre os diferentes cenários estudados.

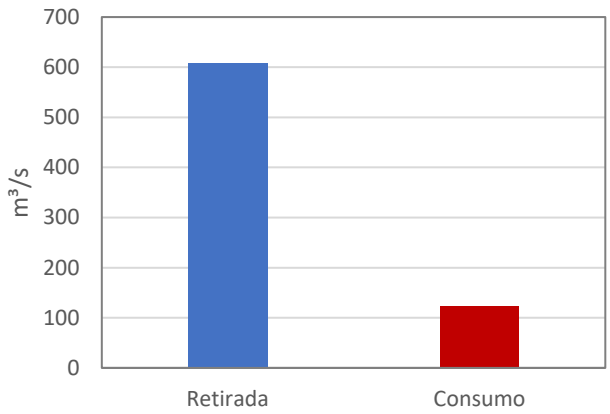
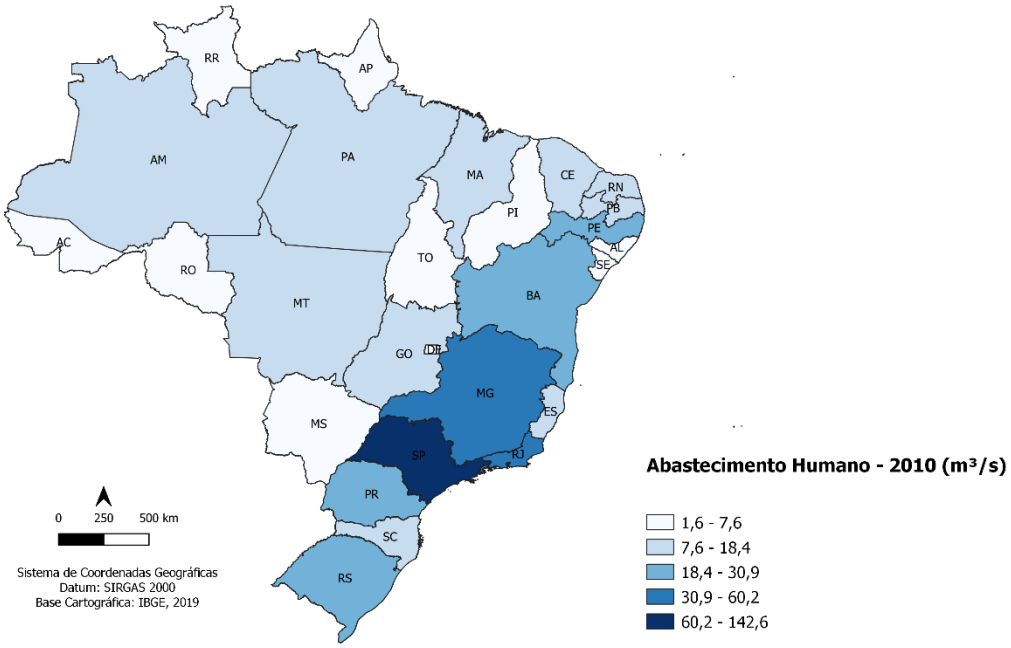


Figura 50: Comparação entre retirada e consumo de água para abastecimento humano (2050)

Fonte: Elaboração própria



Na Figura 51 e na Figura 52 podem ser observadas a classificação dos estados, de acordo com faixas de demanda de água. Os estados com maior densidade populacional, naturalmente terão um maior consumo de água. O estado de São Paulo que concentra 22% da população (IBGE, 2010), seguido por Minas Gerais, com aproximadamente 10% da população total. Outro fator que influencia a retirada de água nos estados é o índice de perdas. Alguns estados na região Norte, ainda que menos populosos, possuem elevados índices de perda na distribuição de água, fazendo com que a retirada seja mais elevada.

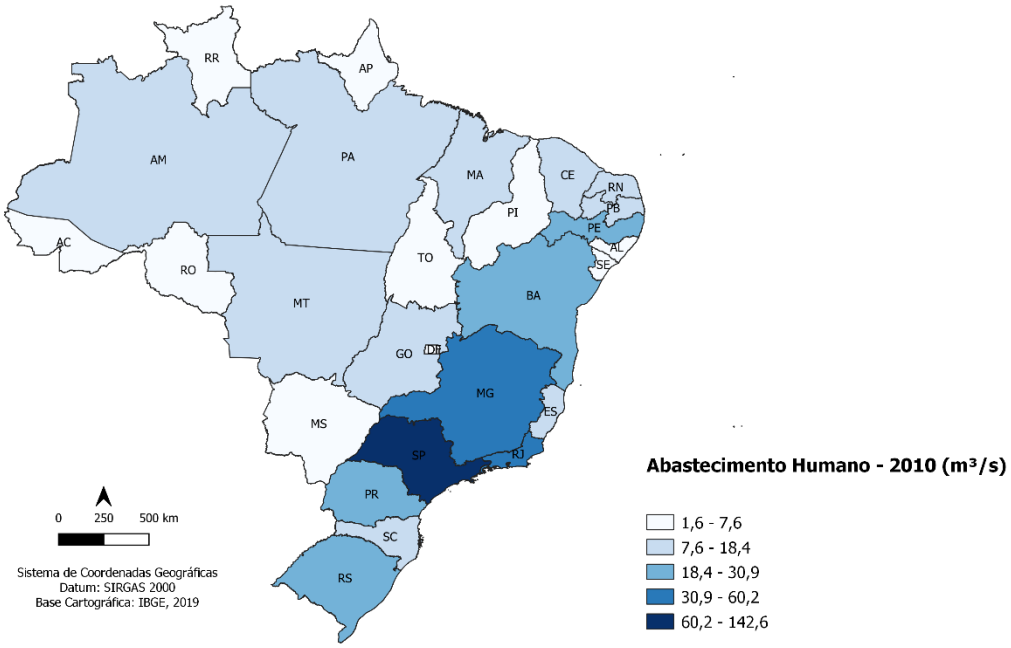


Figura 51:Abastecimento Humano por Estado Brasileiro em 2010

Fonte: Elaboração própria

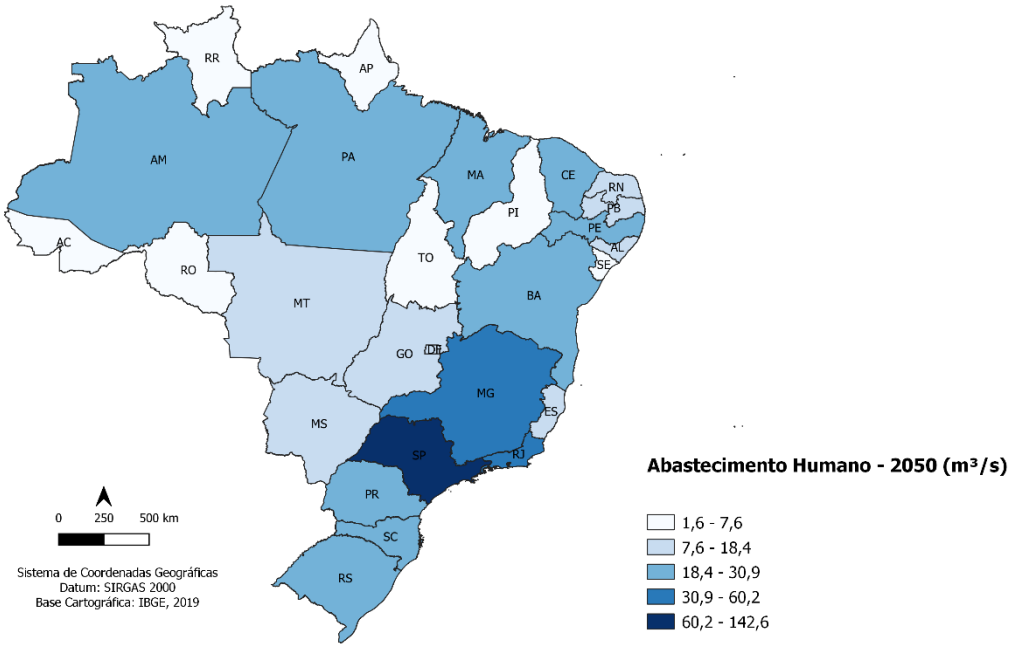


Figura 52: Abastecimento Humano por Estado Brasileiro em 2050

Fonte: Elaboração própria

Nesse sentido, as premissas adotadas de que 100% da população urbana é atendida e que o índice de perdas deve ser mantido podem ser relaxadas para estudar melhorias na gestão de água no setor de abastecimento urbano, através de medidas de redução de perdas e maior eficiência no uso de água do lado demanda.

O setor da pecuária está representado nesse estudo a partir de água utilizada para a dessedentação animal. Os valores de retirada para o abastecimento animal podem ser observados na Figura 53**Erro! Fonte de referência não encontrada.**. Não há uma diferença significativa para o valor total da retirada entre os cenários, contudo é possível perceber que a distribuição espacial da demanda pode variar de acordo com os cenários. Foi escolhido o ano de 2030 para análise para retratar os efeitos das políticas induzidas de mudança do uso do solo. Pode-se perceber que para o cenário IEG, onde ocorrem taxas de desmatamento, em especial nos biomas da Amazônia e o Cerrado, há uma conversão significativa de áreas de florestas nativas em pastagem, e consequentemente maior concentração do rebanho bovino distribuídas nos estados do Pará, Mato Grosso e Roraima em relação ao cenário SEG. Enquanto isso, no cenário SEG, parte do rebanho é migrado para o estado de São Paulo.

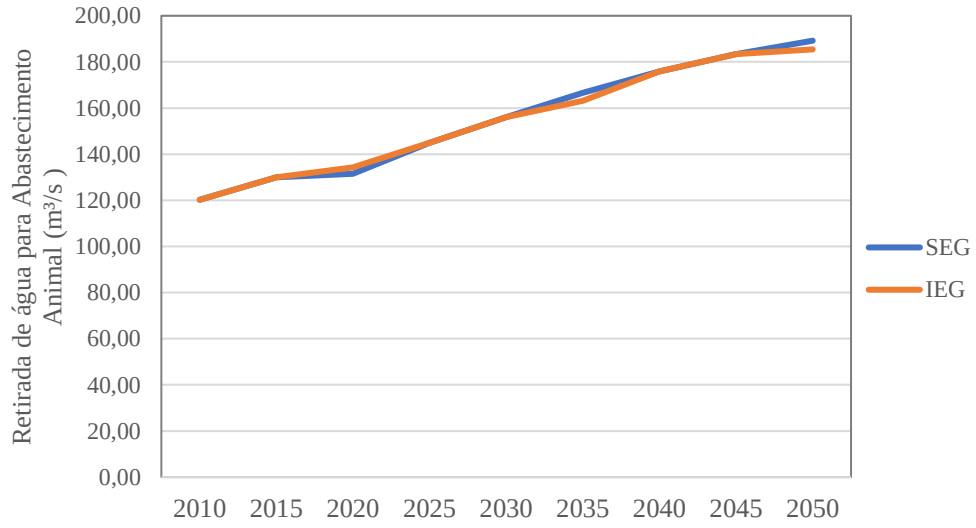


Figura 53:Retirada de água para abastecimento animal 2010 -2050

Fonte: Elaboração própria

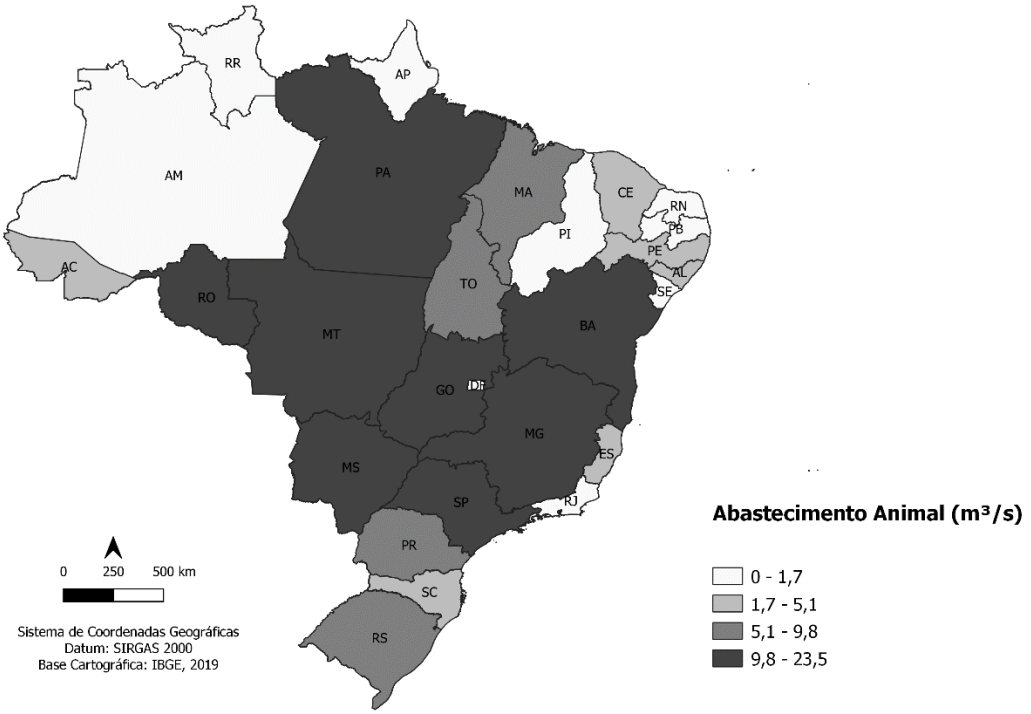


Figura 54: AbastecimentoAnimal para cenário IEG em 2030

Fonte: Elaboração própria

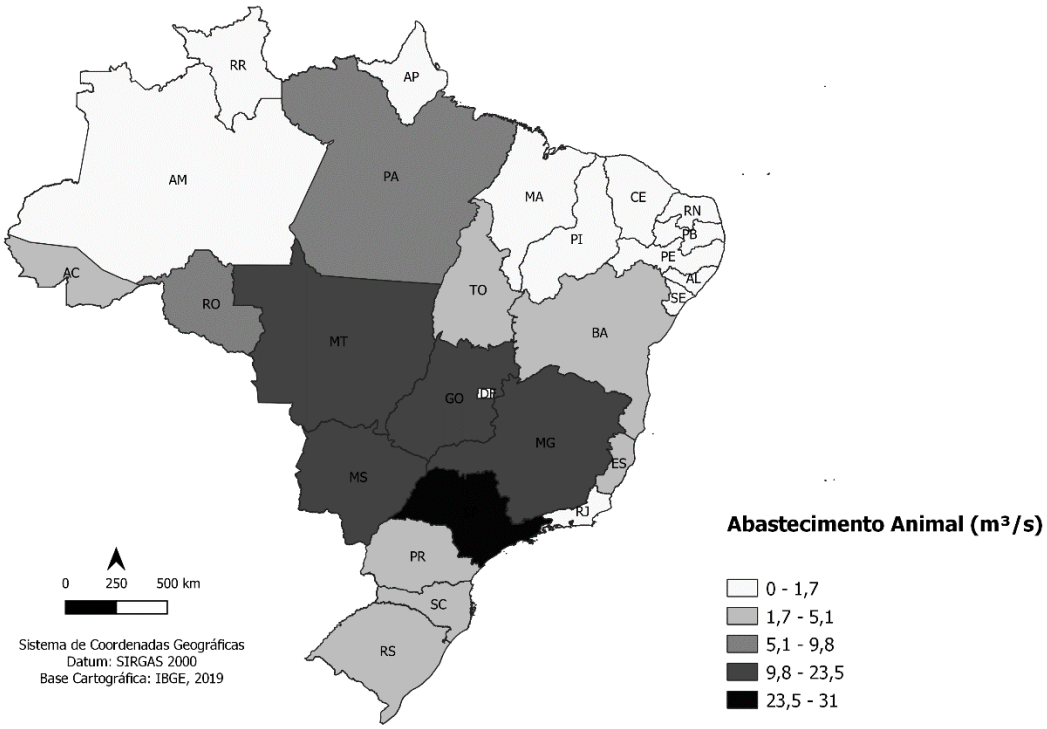


Figura 55:Abastecimento animal para cenário SEG em 2030

Fonte: Elaboração própria

4.3.4. Análise Integrada do Nexo

A análise integrada permite identificar potenciais situações de agravamento de conflito pelo uso da água. Nas Figura 56 e Figura 57 são apresentadas a evolução da retirada de água para os cenários SEG e IEG respectivamente. Em ambos os cenários, a irrigação representa a maior parcela do uso de água em comparação com os demais setores, seguida pelo setor de energia e o abastecimento urbano. O setor de energia é o segundo mais relevante quando comparado com os demais em termos de retirada. Atualmente, nos documentos oficiais, pelo fato do setor de energia ser retratado indiretamente, de forma apenas parcialmente desagregada pela (ANA, 2017a, 2019b), não se pode ter uma real relevância do uso de água para energia. Contudo, este trabalho mostra que o setor possui uma grande importância. Além disso, como discutido anteriormente, uma maior dependência de bicombustíveis na matriz energética no Brasil provoca uma maior demanda de água para irrigação, que está contabilizada como água para irrigação, mas tem como finalidade o uso energético, configurando-se assim um uso indireto da água para energia.

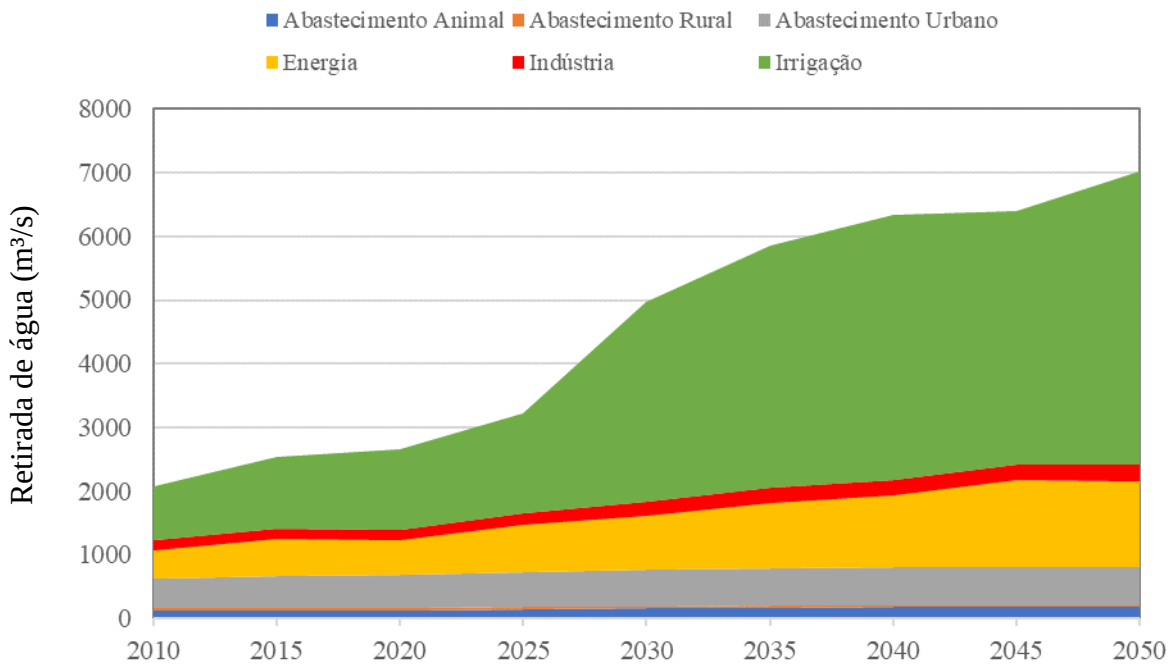


Figura 56:: Evolução da retirada de água por setor 2010-2050 para o cenário SEG

Fonte: Elaboração própria

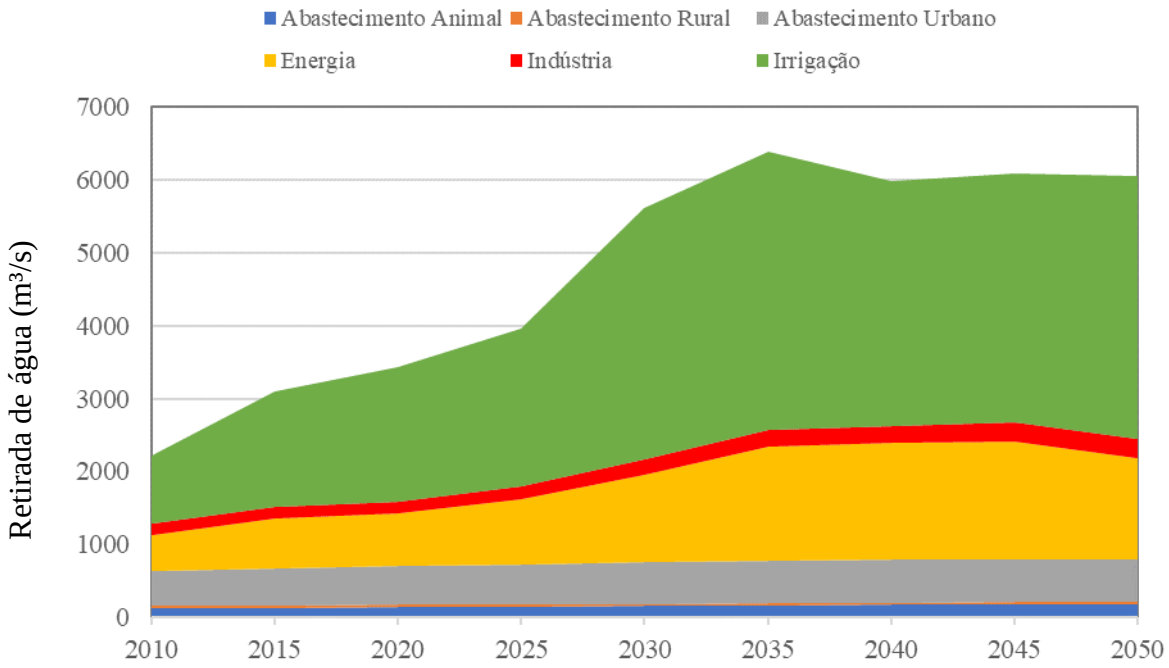


Figura 57: Evolução da retirada de água por setor 2010 -2050 para o cenário IEG

Vale ressaltar ainda que durante o período 2010 – 2030 há uma maior pressão sobre o sistema hídrico para o cenário de governança intermediária, que coincide com os períodos de maior taxa de desmatamento. Durante o período 2030 a 2050 esse comportamento se inverte, e o cenário de governança forte parece pressionar mais o sistema hídrico. Com a maior restrição de emissões no primeiro período analisado, devido às maiores taxas de desmatamento, o cenário IEG pressiona mais fortemente o setor de energia, que por sua vez, recorre a opções de mitigação como eletrificação e o aumento da cogeração a bagaço, pressionando assim, tanto os recursos hídricos, quanto o solo. Outros impactos negativos do desmatamento sobre a disponibilidade e qualidade de água não são contabilizados aqui, de forma que pode haver uma pressão ainda maior durante esse período.

No segundo período 2030 – 2050, o cenário IEG possui uma matriz com maior eletrificação, e prevê uma maior participação da hidrelétrica e uma maior expansão da energia eólica, em que não foi considerado um uso de água significativo. Portanto, ainda que possua um custo maior essas opções tecnológicas gerou uma menor pressão sobre o sistema hídrico.

No ano de 2030 o cenário de governança forte apresenta uma retirada global de 4.972 m³/s, enquanto o cenário de maior desmatamento da vegetação nativa levaria a uma retirada de 5.621 m³/s. Ademais, nota-se que a restrição da emissões pressionam diretamente o setor de energia e o de uso do solo ocasionando uma maior retirada e consumo de água nos dois cenários, impulsionados em ambos os casos pelo maior emprego da bioenergia. Um maior desmatamento antecipa a pressão sobre o setor de energia, além de incorrer em maiores custos de investimento e operação e manutenção para o setor de energia.

Na Figura 58 é observado de maneira similar a evolução do consumo de água para cada um dos setores. Em termos de consumo de água, o setor de irrigação é o mais importante para todos os cenários e anos analisados. Contudo, para o cenário SEG, o consumo de água para irrigação é proporcionalmente ainda maior em relação aos outros.

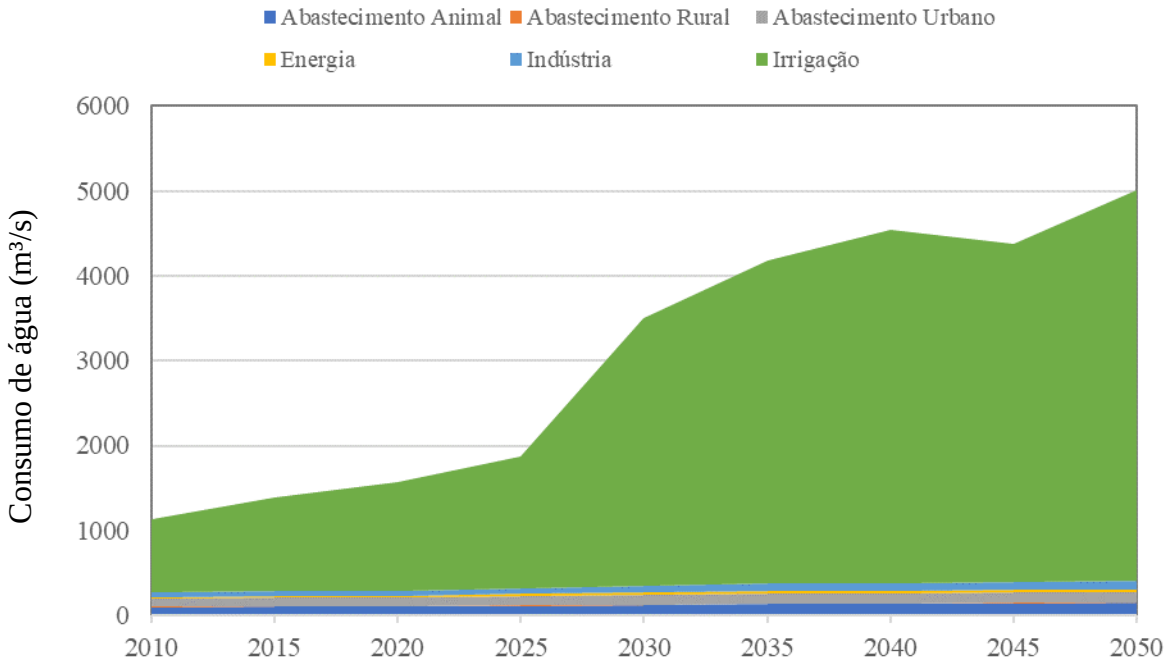


Figura 58: Evolução do consumo de água por setor entre 2010 - 2050 para o cenário SEG

Fonte: Elaboração própria

A análise do nexo portanto, mostra que as opções tecnológicas mais custo efetivas em todo o período foram notadamente a partir da bioenergia. É possível perceber que as mudanças climáticas têm um impacto indireto alto sobre os recursos hídricos e sobre o uso do solo que não pode ser negligenciado. Ademais, foi possível concluir que num longo prazo, a escolha pela eletrificação e a expansão do sistema baseado em uma maior participação de eólica e geração solar distribuída reduziu a pressão sobre o uso do solo e

os recursos hídricos. Isso demonstra novamente que não incluir restrições hídricas no modelo de otimização, pode induzir soluções que são inviáveis ou piores do ponto de vista de recursos hídricos. Além disso, reforça a importância de especificar por região hidrográfica ou bacia.

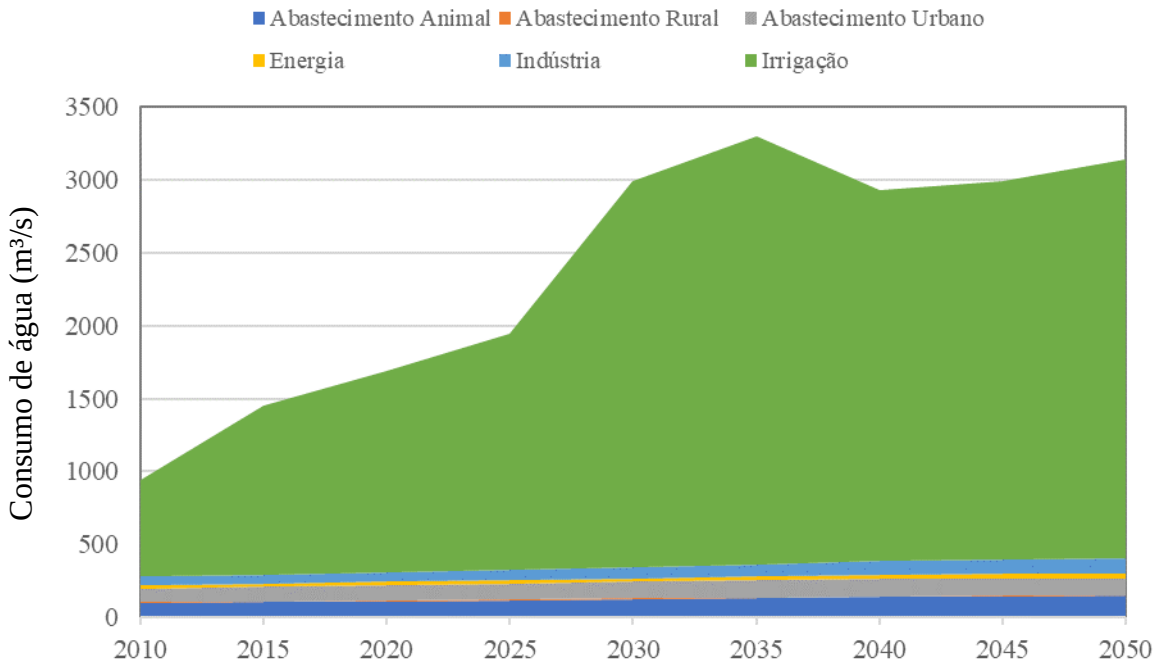


Figura 59: Evolução do consumo de água por setor entre 2010 - 2050 para o cenário IEG

Fonte: Elaboração própria

A análise dos resultados globais é capaz de dar um panorama sobre os principais usuários de água no país. Contudo, para fins de gestão de recursos hídricos essa análise é ainda mais relevante no nível das bacias hidrográficas. O detalhamento proposto nesse estudo divide as demandas no nível das 12 principais regiões hidrográficas. Nas figuras a seguir são apresentadas as demandas de uso de água por setor para cada uma das bacias para os anos de 2010 e 2050. Na Tabela 42 podem ser vistas as vazões de retirada totais por cenário e para os anos 2010, 2030 e 2050. Destaca-se o crescimento siginificativo das vazões para as bacias do Atlântico Nordeste Oriental e Ocidental, São Francisco e Parnaíba. Todas essas regiões hidrográficas apresentam bacias com nível de estresse hídrico, ressaltando a importância de considerar restrições de disponibilidade hídrica nas escolhas das tecnologias de mitigação.

Tabela 42: Vazões de retirada (m³/s) para as regiões hidrográficas para os cenários estudados

	Cenário SEG	**Cenário IEG**

Região Hidrográfica	2010	2030	2050	2010	2030	2050
ALT	61,8	160,3	253,7	62,8	188,6	253,4
AMZ	77,4	122,4	144,9	83,4	138,9	181,7
AOC	30,1	103,5	140,4	30,5	114,2	114,3
AOR	83,6	990,8	1591,0	84,0	1265,7	1384,3
ASD	151,0	168,6	172,4	156,0	167,1	161,0
ASU	216,2	306,9	373,2	231,3	287,9	321,5
PRB	15,5	114,1	168,1	15,5	125,1	129,5
PRG	44,9	54,0	65,6	59,1	69,1	69,5
PRN	844,1	1049,8	1362,3	927,1	1281,8	1248,3
SFO	218,8	1087,5	1711,4	221,0	1160,4	1439,6
TOC	115,7	510,7	643,3	140,1	540,2	423,0
URU	212,7	303,8	395,6	212,8	282,2	331,8

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 60 e na Figura 61[29] é apresentada uma análise para a retirada de água superficial para os diferentes setores para os cenários SEG e IEG, respectivamente. A seguir é feito uma breve discussão dos resultados encontrados para cada uma das bacias.

[29] Legenda para as Figuras a seguir:

AMZ – Região Hidrográfica da Amazônia

AOC – Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental

ALT – Região Hidrográfica Atlântico Leste

AOR – Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental

ASE – Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste

ASU – Região Hidrográfica Atlântico Sul

PRN – Região Hidrográfica Paraná

PRB – Região Hidrográfica do Parnaíba

PRG – Região Hidrográfica Paraguai

SFO – Região Hidrográfica do São Francisco

TOC – Região Hidrográfica do Tocantins Araguaia

URU – Região Hidrográfica Uruguai

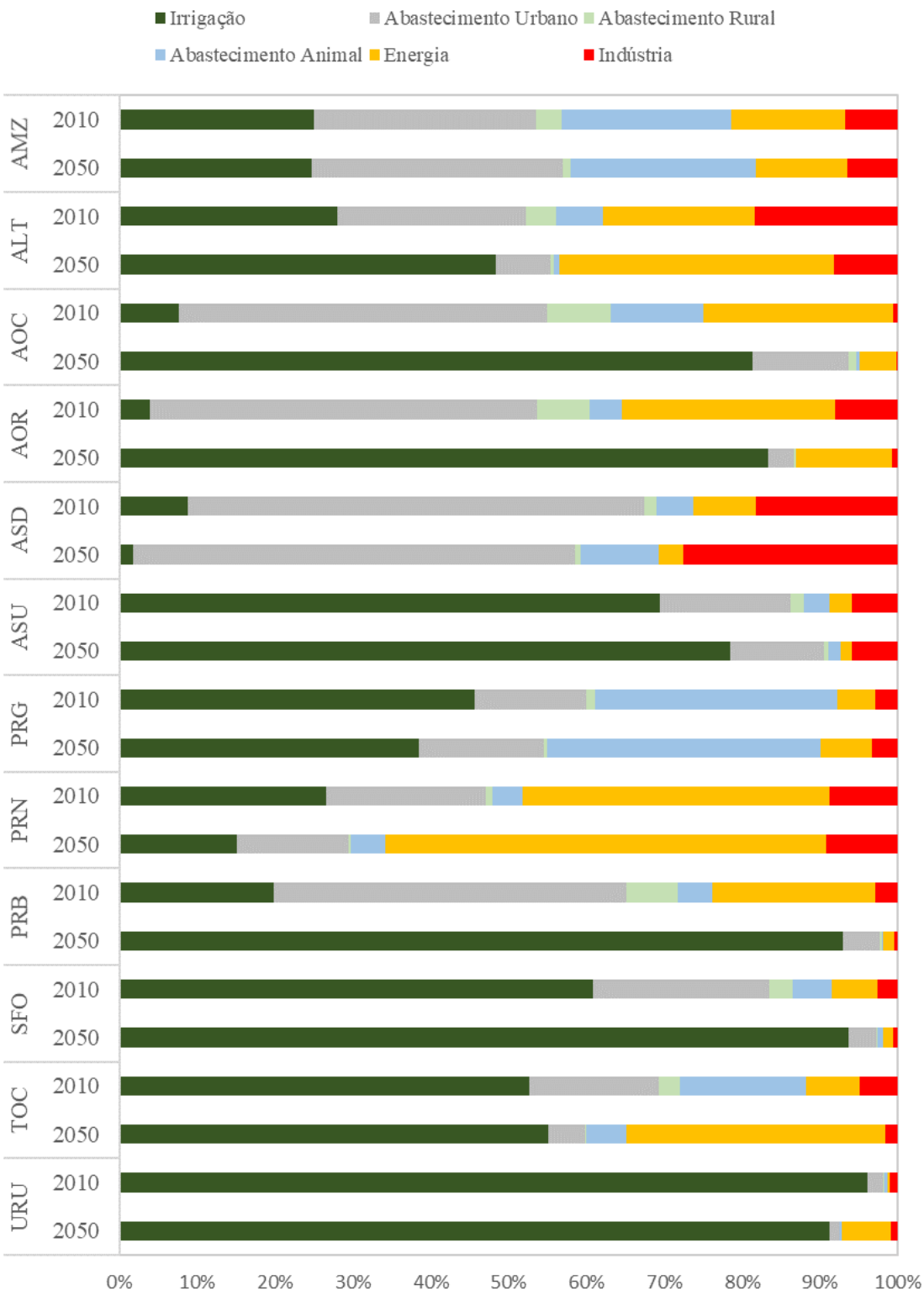


Figura 60: Análise do uso de água por setor no cenário SEG

Fonte: Elaboração própria

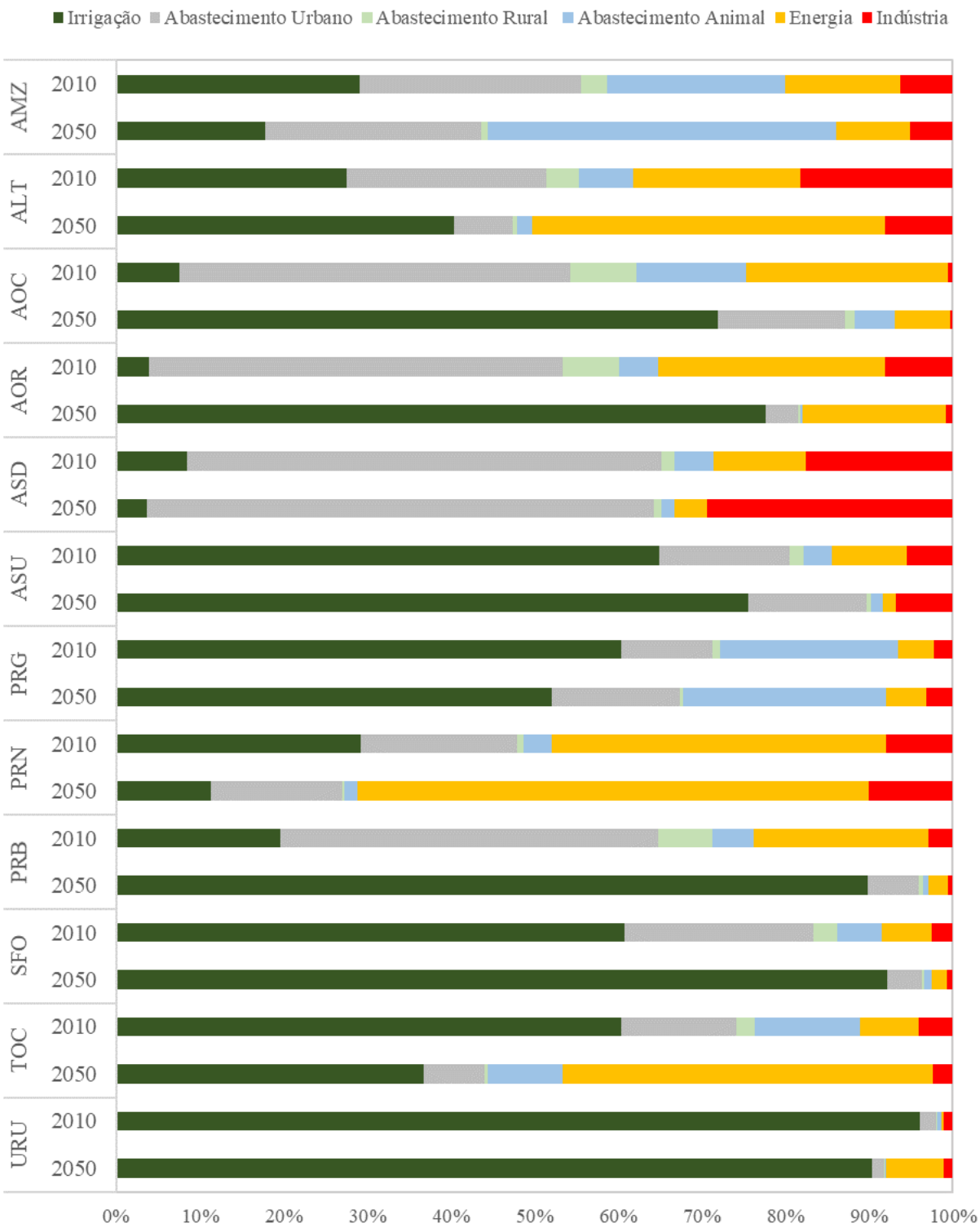


Figura 61: Análilse do uso de água por setor para o cenário IEG

Fonte: Elaboração própria

4.3.4.1. *Região Hidrográfica Amazônica*

Em 2010 o modelo encontra uma participação do uso de água para superior ao previsto por (ANA, 2017a), contudo é visível que, conforme o esperado, os usos preponderantes nessa bacia são o abastecimento urbano e o abastecimento animal. Para o cenário IEG, observa-se um aumento considerável da participação da retirada para abastecimento animal. Isso deve-se às maiores taxas de desmatamento, consideradas nas políticas de uso do solo, que levam a uma maior substituição de áreas de florestas por áreas de pastagens e criação bovina. Em ambos os cenários é possível observar também uma redução da relevância do abastecimento para população rural, indicando um maior índice de urbanização nessa região. Isso aponta para a necessidade de se atentar às questões de saneamento e qualidade de água. Na Bacia Amazônica observa-se a redução da componente de energia, pois nessa região o uso de água para energia está associado na maior parte ao refino, exploração de petróleo *onshore*, e às termelétricas. Portanto, com a menor participação dos combustíveis de origem fóssil na matriz em 2050, conforme esperado, resultou em uma redução da parcela de energia nessa bacia.

4.3.4.2. Atlântico Leste

Nessa região a representação da configuração inicial apresentou algumas discrepâncias nas comparações para o ano de referência 2010 e o relatado por ANA (2017b) ao subestimar a participação da componente irrigação. Mas é possível perceber que há uma tendência de aumento da relevância relativa da agricultura irrigada, acompanhado de um aumento expressivo da água para energia, sugerindo que essa expansão liderada principalmente pela expansão da cana-de-açúcar, presente nesta bacia na maior parte das áreas cultiváveis, deve impulsionar o aumento da retirada de água nesta bacia

4.3.4.3. Atlântico Nordeste Ocidental

O uso mais relevante observado nesta região é destinado ao abastecimento humana, o que é coerente com o cenário real. Contudo, o uso de água para energia que não é contabilizado pela ANA de forma explícita, e esse uso é responsável por uma parcela

significativa no ano de referência, que decresce proporcionalmente devido a preponderância do uso de água para irrigação. Na Tabela 42observa-se que a retirada da bacia possui o segundo menor valor de retirada 30 m³/s, que cresce indicando uma maior participação de energia, principalmente pela presença de UTE.

No cenário IEG, também pode ser observado um aumento da relevância da agricultura irrigada, levada principalmente pelo potencial de expansão do MA. A variação entre os cenários nessa região não é muito significativa.

4.3.4.4. Atlântico Nordeste Oriental

Nessa bacia o ponto mais crítico é a baixa oferta de recursos hídricos, sendo portanto, o uso prioritário para abastecimento humano e dessedentação animal, conforme previsto pela Política Nacional de Recursos Hídricos. Pode ser observado também um componente importante da energia, que não aparece em ANA (2017). O maior uso de água, deve-se a produção de etanol, com uma grande concentração de usinas sucroalcooleiras localizadas principalmente no litoral dessa região.

Há ainda um discreto potencial de expansão para a cana-de-açúcar, mas devido às distorções discutidas anteriormente, o modelo aloca grande parte da expansão da cana do país no Nordeste. Portanto, grande parte dessa expansão é alocada nessa bacia, de acordo com os critérios de produtividade a cana é alocada preferencialmente nos estados de alagoas e Sergipe. De acordo com a atual divisão das outorgas para irrigação, quase 60 % do volume outorgado para irrigação nesse estado é proveniente da AOR, enquanto a outra parte vem do SFO, que é mantida fixa em todo o período avaliado. Essa maior expansão provavelmente dependeria de uma maior retirada proporcional da RH de SFO.

É importante notar que um aumento tão expressivo para irrigação nessa região hidrográfica não seria viável, uma vez que ela já se encontra em uma situação crítica de balanço hídrico quantitativo. Tal configuração proposta levaria muito provavelmente a conflitos pelo uso da água, e competição com o uso para abastecimento urbano.

4.3.4.5. Atlântico Sudeste

No cenário SEG – o ano de referência apresentou uma representação coerente com a realidade. Há uma predominância do uso para abastecimento urbano, que apresenta um forte aumento, justificado pelo fato de ser a segunda região hidrográfica mais populosa,

atrás apenas do Paraná. Na região do ASD está localizado a megalópe do RJ, em que é projetado um significativo crescimento da população urbana. Outro uso de água importante nessa região é o uso industrial, com destaque da proporção de mineração, dos estados de MG, RJ e ES. Esse mesmo comportamento também é observado em ANA (2017) em que a componente de mineração está explicita. O cenário IEG mostra uma expansão um pouco maior para irrigação, mas o mesmo comportamento que o cenário SEG.

O uso de água para energia aqui é importante tanto para as termoelétricas, quanto para refino e para produção de etanol.

Apesar da situação confortável aparente, algumas bacias importantes nessa região apresentam estado crítico como Paraíba do Sul e a Bacia do Rio Doce.

4.3.4.6. Atlântico Sul

A representação dos usos de água para a bacia do Atlântico Sul foi bem capturada pelo modelo. A bacia apresenta a irrigação com o uso predominante, ocasionado principalmente pela prática da rizicultura nessa região. Devido à alta produtividade, associada à irrigação e às condições edafoclimáticas da região, nos próximos anos a expansão da cultura irrigada para produção de arroz é alocada preferencialmente nas bacias do Atlântico Sul e Uruguai, dado a grande produção dessa cultura no estado do Rio Grande do Sul.

Essa bacia já possui uma situação em percurso de conflito entre os usos de irrigação e abastecimento humano. A significativa expansão da agricultura irrigada, juntamente com o aumento da demanda por água para abastecimento humano também pode levar a situações de acirramento dos conflitos de água.

4.3.4.7. Paraguai

Na região do Paraguai, pode ser observada a predominância do uso de água para o abastecimento animal. No cenário sem desmatamento, esse uso continua sedo muito importante, e há uma variação da componente da agricultura irrigada. O percentual encontrado em 2010 parece um pouco superestimado em relação ao calculado em ANA.

Contudo, a expansão principalmente de milho, soja e cana-de-açúcar levam a um uso significativo de água para irrigação.

No cenário com maior desmatamento é possível observar um ganho considerável da relevância da irrigação. Isso se dá principalmente pelo avanço da produção de soja, que é um dos principais vetores do desmatamento na região do Cerrado. O abastecimento animal continua apresentando um componente importante, mas cresce a relevância da área irrigada. O setor de energia e indústria apresentam um discreto crescimento nesse período para os dois cenários.

4.3.4.8. Paraná

Na bacia do Paraná ocorrem as maiores retiradas em todo país em 2010 como pode ser observado também na Tabela 42. Como no cenário SEG, a cana-de-açúcar é realocada, não sendo localizada no Sudeste, a pressão para irrigação é transferida em maior parte para as bacias do SFO e AOR, o que faz com que em 2030 e 2050 a bacia do Paraná, apesar de apresentar uma maior oferta de recursos hídricos fique como a 3ª maior retirada apenas de água, o que reforça a hipótese que é essencial levar em consideração outras restrições para a alocação das culturas afim de evitar tais distorções.

É importante ressaltar que nessa região o uso de água para energia é o maior de todos. Esse ponto não fica evidente na análise dos usos em ANA (2017), dado que a energia não está totalmente representada. O principal vetor do aumento do uso de energia é a ampla concentração de usinas sucroalcoleiras nessa região hidrográfica. De acordo com os critérios para localização dessa energia para o período 2010 -2050 foram consideradas as áreas prioritárias para expansão da cana-de-açúcar, que ao contrário do resultado da projeção do modelo, indica uma forte expansão nos estados de SP, principalmente e também MS e PR. Dessa forma grande parte da expansão da geração de biocombustíveis e eletricidade a partir da cogeração a bagaço fica localizada nessa região. Para que esse resultado seja mais coerente seria necessária uma alocação das culturas para essa região hidrográfica, pois a produção de biocombustíveis deve estar localizada próxima a produção da matéria-prima. Essa realocação nessa bacia iria reduzir a pressão dos recursos hídricos nas outras duas SFO e AOR para irrigação.

O comportamento para o cenário IEG é similar, com grande importância também para o componente de energia. É importante ressaltar que a indústria e o abastecimento humano também são representativas nessa região. Por apresentar uma diversidade grande

dos usos de água podem ocorrer conflitos mais localizados a nível de subbacias. Em ANA (2017) são apresentadas 8 bacias críticas dentro dessa região hidrográficas, que representam 13,8 % da área da RH, como: Grande, Mogi-Guaçu, Pranapanema, Sapucaí Mirim.

4.3.4.9. Parnaíba

Na região do Parnaíba pode ser observado um crescimento expressivo da irrigação nos períodos, levado principalmente pela expansão da cana-de-açúcar e da soja no Maranhão e do milho no Piauí e Ceará. Esse resultado poderia gerar uma séria competição pelos usos da água para abastecimento humano e para energia.

Em 2010 observa-se uma participação relevante do uso de água para energia, principalmente pela geração termelétrica. Não são observadas grandes variações para o cenário IEG.

4.3.4.10. São Francisco

Os resultados para a bacia de São Francisco representam bem os usos na bacia com base nos dados históricos, mostrando um peso significativo da água para irrigação, seguida pelo abastecimento humano e, também uma pequena parcela para indústria e uso para bioenergia. Os resultados do modelo apontam para um aumento significativo da irrigação nessa região. Contudo, ainda que seja de fato esperada uma expansão da agricultura irrigada nessa área, por abrigar grande parte da fronteira agrícola, esse valor pode estar um pouco superestimado, devido às distorções já explicadas anteriormente. Para o cenário IEG são observados comportamentos semelhantes. Para o cenário SEG, a retirada total de água é ainda maior que para o cenário IEG em 2050 como mostra a Tabela 42.

4.3.4.11. Tocantins- Araguaia

A representação dos usos da bacia parece estar coerente, com a componente principal para irrigação, seguido por uma elevada parcela de participação de água para

abastecimento animal. Nessa região hidrográfica destaca-se o expressivo crescimento para o uso de água para energia, com maior participação de biocombustíveis como etanol, bioquerosene e biodiesel e para usinas termelétricas.

Para o cenário IEG o crescimento do uso de água para energia é ainda maior, e destaca-se, também, uma maior parcela para o abastecimento animal.

4.3.4.12. Uruguai

Nessa região pode ser observado um uso predominante de água para irrigação. A bacia já enfrenta situações de criticidade, com conflitos com o uso para abastecimento urbano. O crescimento da componente de energia, induzida principalmente pela cogeração a bagaço, pode ser mais um fator para agravar possíveis situações pelo conflito de uso pela água.

4.3.5. Balanço Quantitativo

A análise do balanço quantitativo permite identificar em que medida as demandas pressionam os recursos hídricos disponíveis em cada uma das bacias. O cálculo foi feito a partir da razão entre a demanda por recursos hídricos e a vazão de referência Q95, conforme realizado por ANA (2013a). Como não foi feita distinção entre o uso de água subterrâneo ou superficial, foi feito um balanço em relação às vazões outorgadas por cada setor em cada região hidrográfica para se estimar a parcela da demanda que é atendida pela captação de água superficial e qual parcela é atendida através de poços subterrâneos. Dessa forma, pode-se comparar apenas o correspondente a parcela das retiradas de corpos hídricos superficiais para o confrontamento com as vazões de disponibilidade hídrica superficial de cada uma das regiões.

Pode-se observar também que para o cenário SEG, em 2010 a região hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental já apresenta um nível de criticidade muito crítico, enquanto as bacias do Paraná, Atlântico Sudeste, Atlântico Leste e São Francisco apresentam uma situação preocupante. Em 2030, em grande medida devido à expansão da área irrigada, localizada largamente na região nordeste, gera um agravamento da criticidade de todas as regiões hidrográficas que passam para um nível crítico ou muito crítico.

Para o cenário IEG, pode-se observar na Figura 65 e na Figura 66 uma criticidade parecida nas Regiões Hidrográficas no Nordeste para o ano de 2030, contudo para o ano de 2050 é mantido o mesmo cenário de criticidade.

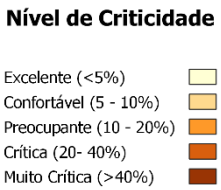


Figura 62: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para cenário SEG em 2010

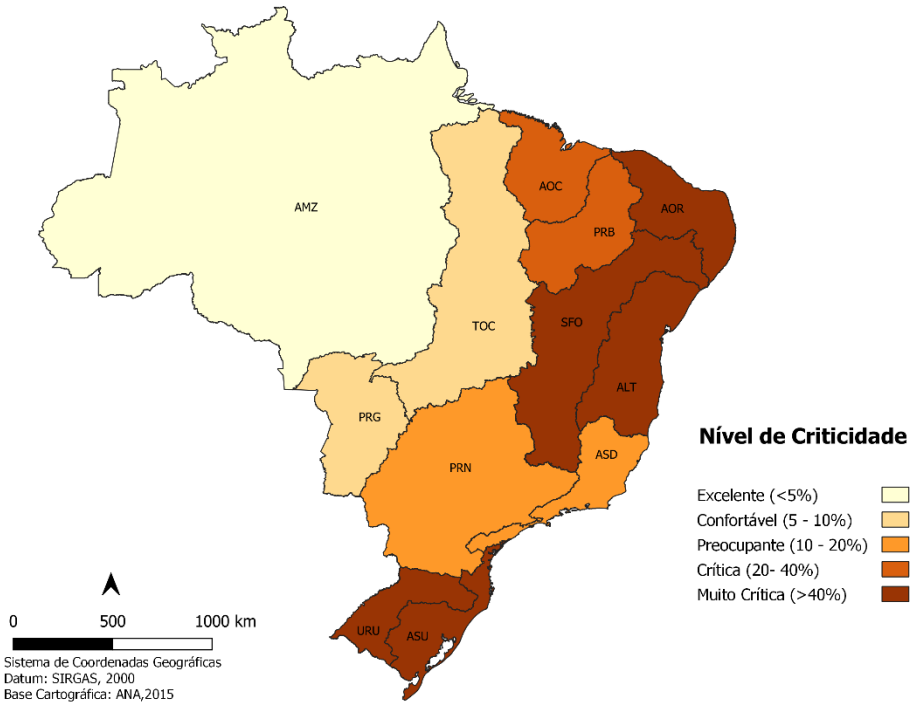


Figura 63: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para o cenário SEG em 2030

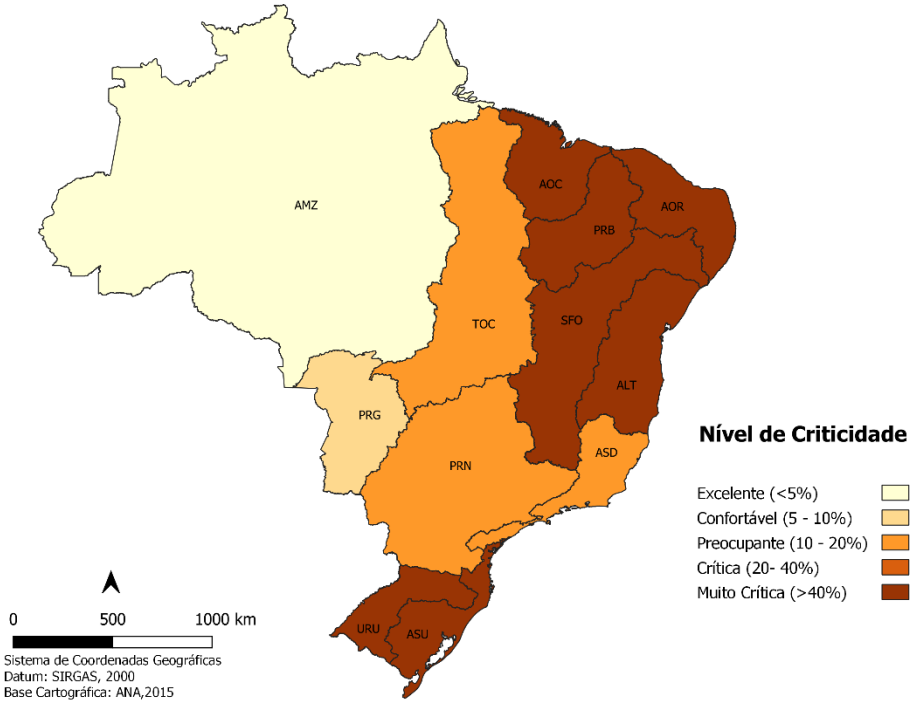


Figura 64: Nível de criticidade nas bacias hidrográficas para cenário SEG *em 2050*

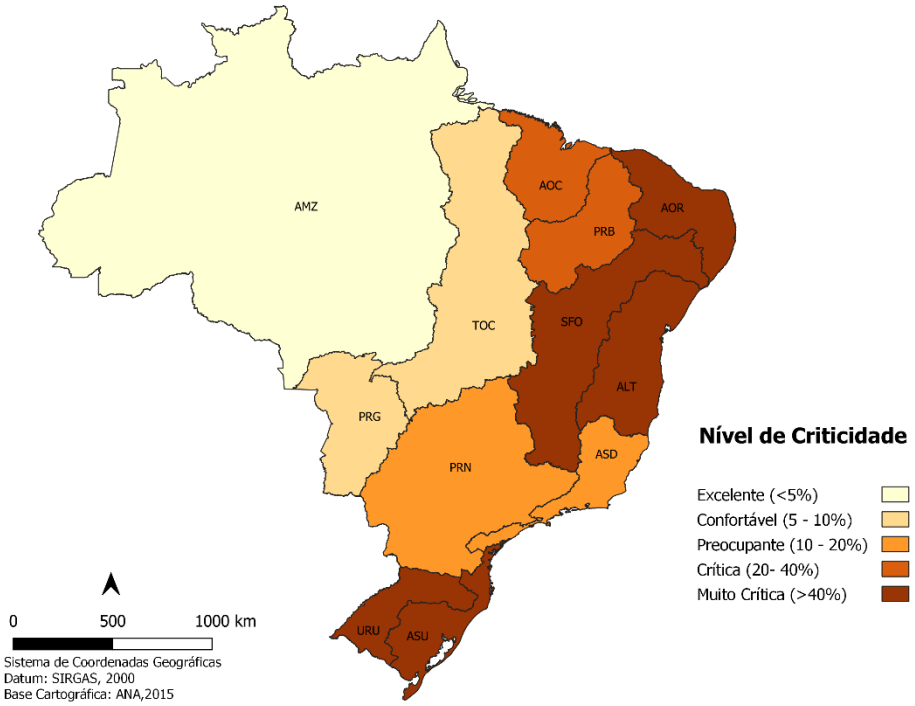


Figura 65: Criticidade Hídrica para o cenário IEG em 2030

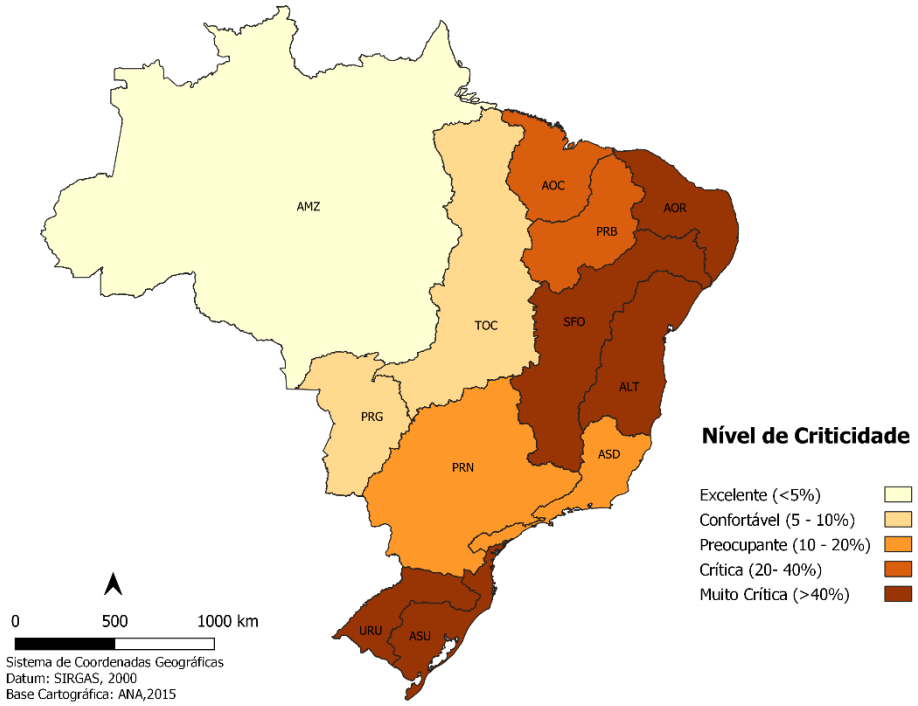


Figura 66: Estresse Hídrico para o cenário IEG em 2050

5. Capítulo 5 - Conclusão

5.1. Conclusões

A urgência da crise climática e a iminente necessidade de ação torna fundamental o estudo das alternativas tecnológicas para se cumprir com os pactos de redução de emissões de GEE e a compreensão das suas implicações em outras esferas.

Essa dissertação teve como objetivo a construção de um modelo técnico paramétrico como ferramenta para avaliação da componente de água no nexo clima, água, energia e uso do solo. Foi possível quantificar o uso desse recurso a partir do modelo de avaliação integrada BLUES, que tem foco no estudo das interações entre clima, uso do solo e energia, trazendo, portanto, uma análise das implicações de cenários estuados no modelo sobre as principais regiões hidrográficas no Brasil.

Foram analisados os principais setores relevantes e usuários consuntivos da água: uso do solo para a finalidade de irrigação, pecuária para finalidade de abastecimento animal, energia, indústria e abastecimento humano. A projeção das demandas e comparação entre os diferentes setores no nível regional amostrou-se um ponto chave para identificar possíveis competições pelo uso da água e acirramento de conflitos já existentes. Esse tipo de estudo pode servir como subsídio para guiar não só um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, mas também as escolhas tecnológicas e sua disposição territorial.

Nesse sentido ainda, vale ressaltar a relevância da explicitação do setor energético como um importante usuário de água pela Agência Nacional de Águas (ANA). Atualmente, o único uso de água consuntivo explicitado é o de termelétricas. Neste trabalho foi possível ver que no setor de energia, a retirada de água para a cogeração de bagaço cresce significativamente. Em termos de consumo, o papel dos biocombustíveis como consumidor de água fica mais evidente.

A partir da análise do estudo de caso, pode-se observar que as principais opções de mitigação no Brasil, estão diretamente ligadas à mudança do uso do solo e à energia. tanto pelo viés do controle de desmatamento, quando pelo crescimento de tecnologias de bioenergia. Constatou-se que um aumento no desmatamento, gera uma maior pressão que restringe o limite de emissões para o setor energético para se manter dentro do orçamento, que passa a escolher opções de mitigação que apresentam não só um maior custo, mas também um maior requerimento energético e uma maior retirada e consumo de água para o período 2015 - 2030.

É possível constatar também que a eletrificação e a infraestrutura de CCS tiveram um papel importante para o aumento dos custos, contudo, durante o período de 2030 – 2050 pôde-se observar uma maior expansão de renováveis associadas a um baixo uso de água como eólica a energia solar distribuída, o que contribuiu para uma menor pressão sobre os recursos hídricos no cenário com maior desmatamento. Isso mostra que a escolha das opções tecnológicas de mitigação pode afetar diretamente o uso do solo e os recursos hídricos.

A principal conclusão deste estudo, portanto, foi que a inobservância às restrições de disponibilidade hídrica já existente pelo modelo, pode levar a soluções ótimas do ponto de vista da custo-efetividade, e atingir as restrições de emissões, contudo inviáveis do ponto de vista de recursos hídricos. A solução encontrada pelo modelo para ambos os cenários estudados levou a uma situação de alocação de demandas na Região do Atlântico Nordeste Oriental, que ultrapassa a oferta disponível de recursos hídricos.

Foi observado ainda que as projeções da área irrigada nessas configurações levariam a um nível de criticidade muito alto para as Regiões hidrográficas do Parnaíba, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Sul, Uruguai e São Francisco, que atualmente já são bacias em que há situações de competição entre o uso de água. Dessa forma, fica evidente que é essencial trazer o balanço hídrico para a função objetivo da otimização diretamente ou através de uma inequação que atue como restrição do modelo.

Foi possível notar que a localização da expansão da cultura irrigada no Brasil, em especial da cana-de-açúcar é extremamente significativo para a gestão dos recursos hídricos e para o planejamento energético no país. A localização do cultivo da cana-de-açúcar e de outras culturas bioenergéticas implica tanto em uma pressão local pela retirada e consumo pelo uso de água, quanto para a retirada de água para a produção de energia elétrica pela tecnologia de cogeração a bagaço de cana-de-açúcar. É esperado que tanto as usinas sucroalcoleiras e de usinas autônomas seja localizada próxima à produção da cana em larga escala, o que pode gerar uma competição entre os dois usos, e dependendo da região hidrográfica em que se dê a expansão, entrar em conflito com outros usos prioritários.

Pode-se observar também nos cenários estudados uma crescente importância de biocombustíveis avançados, como o bioquerosene produzido a partir do processo *BTL* e pela combinação com a opção de captura e armazenamento de carbono. De forma similar, a projeção para construção de uma infraestrutura para a captura e armazenamento de

carbono, deve levar em consideração a necessidade de concentração da produção energética em determinadas regiões, fazendo com que o estudo da perspectiva de água seja importante.

Diante do cenário heterogêneo dos recursos hídricos no Brasil, o estudo a nível de bacias hidrográficas foi fundamental para identificar os usos preponderantes em cada região. É interessante notar como a disponibilidade de água impacta o desenvolvimento econômico, populacional e urbano do país, que estão distribuídos desigualmente por seu território, assim como a oferta de recursos hídricos. Regiões com grandes concentrações urbanas e áreas economicamente desenvolvidas podem representar também áreas de grande estresse hídrico de acordo com a disponibilidade de recursos de cada bacia hidrográfica. Um exemplo é a Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste, que se classifica como confortável, chegando a uma situação preocupante em 2050. Contudo, sabe-se que importantes bacias como a bacia do Paraíba do Sul possui uma situação crítica de estresse hídrico.

Finalmente, é possível concluir o grau de precisão observados em projeções climáticas de longo prazo, não são capazes de captar as nuances relativas a gestão adequada dos recursos hídricos, que requer um nível de detalhamento muito maior e mais local. Todavia, apesar de desafiador, o entendimento dos impactos sobre o uso da água é fundamental. Os aspectos hidrográficos do Brasil, quando analisados separadamente, nos conduzem a compreensão dos diferentes cenários e da complexidade que é o desenvolvimento de um país com proporções continentais como este. Por isso é de extrema importância a análise local e regional e o link entre modelos globais e regionais.

5.2. Limitações do trabalho

Este estudo, apesar de apresentar cenários interessantes para serem analisados que provocam reflexões a respeito da realidade dos recursos hídricos brasileiros, possui algumas limitações que devem ser ressaltadas para melhor compreensão e para evitar distorções nas interpretações. A análise feita aqui é apenas a da demanda, portanto não capta os potenciais impactos de uma variação na oferta no deslocamento das demandas, devido aos riscos físicos das mudanças climáticas.

O Brasil deve sofrer efeitos diferentes de acordo com cada região. Os principais impactos identificados são a potencial intensificação das condições de aridez no centro

da Região Nordeste e no Sul da Amazônia. No caso da fronteira de expansão agrícola que avança em direção ao interior da maior floresta equatorial do mundo, o clima passaria de tropical úmido para um clima tropical subúmido. Tais variações sobre a disponibilidade hídrica apresentam ainda um elevado grau de incerteza e não foram considerados neste estudo.

Também é uma limitação deste estudo o fato de que as restrições hídricas não são consideradas na escolha das projeções, o que gera distorções como um cenário que propõe uma alta taxa de irrigação em uma bacia que não tem capacidade para tal, ou que conflitaria com o abastecimento urbano.

No curto ou médio prazo, podem surgir tecnologias disruptivas de baixa emissão que não foram consideradas no estudo, de forma a mudar a configuração do setor energético. Outras tecnologias que não são, hoje, consideradas relevantes podem vir a ganhar importância nos próximos anos.

O cálculo de irrigação foi feito de modo simplificado, considerando apenas culturas representativas e uma média do padrão histórico de irrigação. Esses valores podem variar com o tempo, devido a ganhos de produtividade ou variações futuras na demanda de mercado, que não foram levados em consideração neste estudo.

A água consumida por evaporação nas usinas hidroelétricas com reservatório não foi considerada por este trabalho. Por esse setor ser um significante consumidor de água, se considerada a evaporação nas reservas, o resultado de retirada de água para o setor de energia seria mais impactante.

Este estudo levou em conta a utilização apenas das águas superficiais nas Regiões Hidrográficas brasileiras, focando, sobretudo nos potenciais hídricos dos rios. Foram desconsideradas todas as reservas subterrâneas presentes no território nacional.

5.3. Sugestões para Próximos Trabalhos

Dado o fato de que este estudo não preenche todas as lacunas existentes nessa complexa questão dos recursos hídricos nacionais, estudos futuros podem levar em conta o que não foi aprofundado ou foi desconsiderado por este trabalho. Como, por exemplo, a inclusão de restrições hídricas nos critérios de otimização do IAM, de forma que as decisões também levem em consideração a disponibilidade de água, calculando qual o custo adicional de uma configuração diferente devido à citada disponibilidade.

Uma interessante sugestão é estudar cenários de governança de recursos hídricos que explorem tanto políticas do lado da oferta, como do lado da demanda. Do lado da demanda pode ser avaliado o comportamento e as consequências da adoção de instrumentos de comando e controle ou instrumentos econômicos de precificação da água. Do lado da oferta, pode se analisar de que maneira políticas de redução de perdas, reuso de água e mudanças do sistema de resfriamento podem impactar o uso de água.

Um aprofundamento na questão do abastecimento humano pode ser feito ao estudar como ganhos de eficiência e redução de perdas poderiam impactar positivamente, à luz dos ODS. Todavia, uma análise mais cuidadosa pode ser feita, caso fossem estudadas trajetórias distintas ou maior variedade de cenários, por exemplo, estudando os impactos do atendimento às metas do ODS 6.

Uma alternativa de estudo interessante é estudar a disponibilidade de água da perspectiva de pegada hídrica, considerando não só a água azul, mas incluindo também a água subterrânea e considerando no balanço hídrico a água verde e a água cinza, dessa forma alcançando também os impactos da qualidade de água e da variabilidade dos regimes de precipitação.

Uma boa possibilidade é o estudo da qualidade da água sob a perspectiva da redução de sua disponibilidade no caso da água não atender aos critérios qualitativos necessários. Para se considerar o potencial quantitativo de um recurso hídrico, é preciso identificar se a qualidade presente naquela fonte é suficientemente boa para o destino ao qual ela será empregada.

Para o cálculo das demandas no setor industrial, sugere-se endogenizar as demandas para melhorar a projeção do BLUES, identificando os links entre produtos nacionais e necessidades de expansão da indústria nacional, principalmente para a produção de óleo vegetal, dado que esse produto tem relevância no processo produtivo energético. Para a espacialização da demanda deve ser feito um estudo detalhado para identificar a melhor localização dos *clusters* industriais.

Para o caso da evaporação de água nos reservatórios de uso múltiplo, abre-se um campo importante para ser trabalhado. Pode-se levantar a estimativa da alocação dos percentuais de uso de água entre o setor energético e os demais usuários de cada reservatório.

Um tema fundamental para a compreensão dos cenários futuros dos recursos hídricos é a análise de como a mudança climática pode afetar o regime de chuvas durante

os próximos anos, e de que forma essa alteração vai impactar na oferta de recursos hídricos de uma determinada Região Hidrográfica. O aumento ou diminuição dos índices pluviométricos de uma região pode ser fundamental para prever cenários futuros, determinando qual será o destino de cada região.

Anexo I

Projeção da População Urbana e Rural por UF

Ano	2010			2015			2020			2025		
UF	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**
AC	520564	212995	733559	638.229	211.574	849.803	721.081	198.021	919.102	795.576	184.468	980.043
AL	2331424	789070	3120494	2.566.934	783.805	3.350.739	2.709.780	733.595	3.443.375	2.821.651	683.386	3.505.037
AM	2750993	732992	3483985	3.244.427	728.101	3.972.528	3.642.127	681.460	4.323.587	3.993.546	634.819	4.628.365
AP	596361	73165	669526	723.738	72.677	796.414	817.483	68.021	885.505	900.218	63.366	963.584
BA	10053706	3963200	14016906	11.011.308	3.936.755	14.948.063	11.657.009	3.684.572	15.341.581	12.135.485	3.432.389	15.567.874
CE	6213559	2238822	8452381	6.875.599	2.223.883	9.099.483	7.359.480	2.081.424	9.440.904	7.744.262	1.938.966	9.683.227
DF	2467212	102948	2570160	2.808.498	102.261	2.910.759	3.040.897	95.710	3.136.608	3.235.429	89.160	3.324.589
ES	2909932	605020	3514952	3.315.433	600.983	3.916.416	3.613.484	562.485	4.175.969	3.863.414	523.987	4.387.401
GO	5396752	607036	6003788	6.167.039	602.986	6.770.025	6.747.750	564.359	7.312.109	7.230.590	525.733	7.756.323
MA	4310582	2264207	6574789	4.817.982	2.249.099	7.067.081	5.205.497	2.105.025	7.310.521	5.528.535	1.960.951	7.489.486
MG	16565358	3031972	19597330	18.087.572	3.011.741	21.099.313	19.060.215	2.818.813	21.879.028	19.780.572	2.625.885	22.406.457
MS	2061568	387456	2449024	2.326.937	384.871	2.711.808	2.526.543	360.216	2.886.760	2.692.909	335.562	3.028.472
MT	2424813	610309	3035122	2.780.590	606.237	3.386.827	3.055.924	567.402	3.623.326	3.291.270	528.567	3.819.837
PA	5201858	2379193	7581051	6.061.064	2.363.318	8.424.382	6.718.146	2.211.927	8.930.073	7.284.614	2.060.536	9.345.150
PB	2862843	903685	3766528	3.120.647	897.655	4.018.302	3.310.359	840.153	4.150.511	3.461.024	782.650	4.243.674
PE	6975924	1817894	8793818	7.715.191	1.805.764	9.520.955	8.191.820	1.690.089	9.881.909	8.575.378	1.574.415	10.149.793
PI	2043019	1075341	3118360	2.240.136	1.068.166	3.308.302	2.371.301	999.741	3.371.042	2.469.410	931.315	3.400.725
PR	8748548	1695978	10444526	9.646.243	1.684.661	11.330.904	10.257.249	1.576.744	11.833.993	10.736.166	1.468.827	12.204.993

RJ	15509869	480060	15989929	16.731.571	476.857	17.208.428	17.398.113	446.310	17.844.423	17.856.564	415.763	18.272.327
RN	2460425	707602	3168027	2.764.949	702.880	3.467.830	2.973.635	657.855	3.631.490	3.143.540	612.829	3.756.370
RO	1133159	429250	1562409	1.308.915	426.386	1.735.301	1.446.859	399.072	1.845.931	1.563.169	371.758	1.934.927
RR	344136	106343	450479	418.890	105.633	524.523	549.696	98.867	648.563	632.646	92.100	724.746
RS	8920222	1773707	10693929	9.657.639	1.761.872	11.419.510	10.088.533	1.649.009	11.737.541	10.383.476	1.536.146	11.919.621
SC	4904229	1344207	6248436	5.615.420	1.335.238	6.950.658	6.202.519	1.249.704	7.452.223	6.697.744	1.164.171	7.861.915
SE	1505039	562978	2068017	1.705.779	559.221	2.265.000	1.859.495	523.399	2.382.894	1.987.564	487.576	2.475.140
SP	39068781	2193418	41262199	43.144.892	2.178.782	45.323.674	45.524.846	2.039.213	47.564.059	47.323.872	1.899.643	49.223.515
TO	1075803	307642	1383445	1.230.682	305.589	1.536.272	1.348.027	286.014	1.634.041	1.449.938	266.438	1.716.376

Ano	**2030**			**2035**			**2040**			**2045**			**2050**		
UF	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**	**Urbano**	**Rural**	**Total**
AC	865.422	170.914	1.036.336	920.053	157.361	1.077.414	968.736	143.808	1.112.544	994.939	130.255	1.125.194	1.014.912	116.702	1.131.614
AL	2.919.924	633.177	3.553.101	2.966.651	582.967	3.549.618	2.992.237	532.758	3.524.995	2.947.199	482.548	3.429.747	2.885.944	432.339	3.318.283
AM	4.320.731	588.178	4.908.909	4.578.237	541.536	5.119.773	4.812.483	494.895	5.307.378	4.944.782	448.254	5.393.036	5.050.872	401.613	5.452.485
AP	977.680	58.710	1.036.390	1.040.644	54.055	1.094.698	1.099.085	49.399	1.148.484	1.135.411	44.743	1.180.154	1.165.758	40.088	1.205.846
BA	12.524.141	3.180.206	15.704.347	12.671.117	2.928.023	15.599.140	12.727.266	2.675.840	15.403.105	12.482.371	2.423.657	14.906.028	12.174.714	2.171.474	14.346.188
CE	8.071.380	1.796.507	9.867.887	8.245.827	1.654.048	9.899.874	8.366.594	1.511.589	9.878.183	8.300.245	1.369.130	9.669.375	8.197.940	1.226.671	9.424.611
DF	3.405.619	82.609	3.488.228	3.518.916	76.058	3.594.974	3.609.257	69.508	3.678.765	3.622.290	62.957	3.685.247	3.613.316	56.406	3.669.722
ES	4.083.684	485.489	4.569.172	4.234.143	446.990	4.681.134	4.361.824	408.492	4.770.316	4.398.641	369.994	4.768.635	4.416.208	331.496	4.747.704
GO	7.652.272	487.106	8.139.378	7.948.226	448.480	8.396.706	8.209.374	409.853	8.619.228	8.312.309	371.227	8.683.536	8.381.739	332.601	8.714.339
MA	5.823.019	1.816.876	7.639.896	6.009.972	1.672.802	7.682.774	6.159.640	1.528.728	7.688.368	6.163.557	1.384.654	7.548.211	6.137.056	1.240.580	7.377.636
MG	20.349.144	2.432.957	22.782.101	20.552.001	2.240.029	22.792.030	20.619.831	2.047.101	22.666.933	20.249.411	1.854.173	22.103.584	19.800.068	1.661.245	21.461.313

MS	2.841.121	310.908	3.152.029	2.944.150	286.254	3.230.403	3.034.550	261.599	3.296.149	3.065.242	236.945	3.302.187	3.084.190	212.291	3.296.481
MT	3.502.570	489.733	3.992.303	3.655.414	450.898	4.106.312	3.791.580	412.063	4.203.643	3.850.662	373.229	4.223.890	3.893.542	334.394	4.227.936
PA	7.804.053	1.909.145	9.713.198	8.179.465	1.757.754	9.937.220	8.503.149	1.606.363	10.109.512	8.630.850	1.454.972	10.085.822	8.712.738	1.303.582	10.016.320
PB	3.588.929	725.147	4.314.077	3.652.456	667.645	4.320.101	3.694.340	610.142	4.304.483	3.655.075	552.640	4.207.715	3.600.071	495.137	4.095.208
PE	8.908.815	1.458.740	10.367.555	9.090.160	1.343.065	10.433.225	9.215.977	1.227.390	10.443.367	9.137.680	1.111.716	10.249.396	9.011.936	996.041	10.007.977
PI	2.550.761	862.890	3.413.651	2.581.576	794.465	3.376.041	2.593.937	726.040	3.319.977	2.543.221	657.614	3.200.835	2.481.887	589.189	3.071.076
PR	11.141.198	1.360.910	12.502.108	11.355.599	1.252.993	12.608.592	11.505.423	1.145.076	12.650.499	11.420.062	1.037.159	12.457.221	11.296.163	929.242	12.225.405
RJ	18.196.449	385.216	18.581.665	18.255.777	354.670	18.610.447	18.225.043	324.123	18.549.165	17.853.836	293.576	18.147.412	17.432.845	263.029	17.695.874
RN	3.291.501	567.804	3.859.305	3.380.322	522.778	3.903.101	3.447.663	477.753	3.925.416	3.438.117	432.727	3.870.845	3.410.424	387.702	3.798.126
RO	1.665.050	344.445	2.009.495	1.734.544	317.131	2.051.675	1.793.285	289.817	2.083.102	1.812.519	262.504	2.075.023	1.823.390	235.190	2.058.580
RR	692.169	85.333	777.502	739.825	78.566	818.392	784.839	71.800	856.639	815.073	65.033	880.106	842.313	58.266	900.580
RS	10.607.845	1.423.283	12.031.128	10.649.926	1.310.420	11.960.345	10.630.484	1.197.556	11.828.040	10.396.412	1.084.693	11.481.106	10.140.930	971.830	11.112.760
SC	7.133.418	1.078.637	8.212.055	7.437.912	993.104	8.431.016	7.701.243	907.570	8.608.814	7.805.251	822.037	8.627.288	7.880.499	736.503	8.617.002
SE	2.100.756	451.753	2.552.508	2.175.126	415.930	2.591.055	2.236.129	380.107	2.616.236	2.247.106	344.284	2.591.390	2.247.372	308.461	2.555.833
SP	48.802.244	1.760.073	50.562.317	49.513.788	1.620.503	51.134.291	49.971.055	1.480.933	51.451.988	49.454.944	1.341.364	50.796.308	48.750.813	1.201.794	49.952.606
TO	1.542.308	246.862	1.789.170	1.607.827	227.287	1.835.114	1.664.278	207.711	1.871.989	1.685.022	188.135	1.873.157	1.697.625	168.560	1.866.185

Referências Bibliográficas

ALBARELLI, J. Q., ENSINAS, A. V., SILVA, M. A. "Product diversification to enhance economic viability of second generation ethanol production in Brazil: The case of the sugar and ethanol joint production", **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 8, p. 1470–1481, 2014. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.11.016. .

ALEJOS ALTAMIRANO, C. A., YOKOYAMA, L., DE MEDEIROS, J. L., *et al.* "Ethylic or methylic route to soybean biodiesel? Tracking environmental answers through life cycle assessment", **Applied Energy**, v. 184, p. 1246–1263, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.05.017. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.017.

ANA. "Agência Nacional de Águas. Aprova a Lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. Portaria n° 149, de 26 de março de 2015", p. 1–43, 2015a. .

ANA. "Agência Nacional de Águas. Conjuntura Recursos Hídricos do Brasil 2017 Relatório pleno", **Ministério do Meio Ambiente (MMA)**, p. 169, 2017a. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura_completo.caf2236b.pdf.

ANA. **Agência Nacional de Águas - Disponibilidade e Demandas de Recusos Hídricos no Brasil**. **Cadernos de Recusos Hídricos.** 2005.

ANA. **Água na Indústria: Uso e Coeficientes Técnicos.** 2017b.

ANA. **Atlas Irrigação**. Brasília, 2017c.

ANA. **Caderno de Capacitação em Recursos Hídricos - Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos**. 2011.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**, 2015b. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/docs/regioeshidrograficas.pdf.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. **Agência Nacional de Águas (Brasil)**. 2013a.

ANA. "Conjuntura Recursos Hídricos Brasil - Informe Anual", **Agência Nacional de Águas (Brasil)**, n. 11, p. 100, 2019a. .

ANA. **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. 2019b.

ANA. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: Avaliações e Diretrizes para Adaptação**. 2016.

ANA. "Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos", **Agência Nacional de Águas (Brasil)**, p. 76, 2019c. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004. .

ANA. **Planilha de Outorgas emitidas**. 2020a. Disponível em: https://www.ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas.

ANA. **Plano Integrado De Re Cursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio Doce: relatório executivo**. 2013b. v. I. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf.

ANA. "Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) -", 2020b.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2020. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/siga.

ANGELKORTE, G. B. "Modelagem do Setor Agropecuário Dentro de Modelo de Análise Integrada Brasileiro", **Ufrj**, Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Ambiental UFRJ. Rio de Janeiro., 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/DISSERTAÇÃO_-_GERD_ANGELKORTE_Versão_FINAL.pdf.

ARAUJO, E.F. M. "Brazilian Water resourse impacts under global climate and biofuel demand changes". Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Sociais Aplicadas Departamento de Economia. UFPE. Pernambuco, Recife, 2020.

ARVIDSSON, M. "Process integration study of a biorefinery producing ethylene from lignocellulosic feedstock for a chemical cluster", **Arvidsson, M. (2011). Process integration study of a biorefinery producing ethylene from lignocellulosic feedstock for a chemical cluster.**, 2011. .

ASSAD, E. D., MARTINS, S. C., BELTRÃO, N. E. de M., *et al.* "Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil", **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 1–8, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013000100001. .

BARRETO, T. V., COELHO, A. C. D. "Chapter 16 – Distillation", **Sugarcane**, p. 341–363, 2015. DOI: 10.1016/B978-0-12-802239-9.00016-5. 2015.

BATES, B. C., KUNDZEWICZ, Z. W., WU, S., *et al.* **Climate Change and Water**. Geneva, 2008. Disponível em: http://www.citeulike.org/group/14742/article/8861411%5Cnhttp://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_technical_papers.shtml#.UREVW6X7Uy4.

BAZILIAN, M., HOBBS, B. F., BLYTH, W., *et al.* "Interactions between energy security and climate change: A focus on developing countries", **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3750–3756, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.04.003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.003.

BELLEZONI, R. A., SHARMA, D., VILLELA, A. A., *et al.* "Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix", **Biomass and Bioenergy**, v. 115, n. July 2017, p. 108–119, 2018. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.04.017. Disponível em:

https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.017.

BIGGS, E. M., BRUCE, E., BORUFF, B., *et al.* "Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods", **Environmental Science and Policy**, v. 54, p. 389–397, 2015. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.002. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002.

BOSIRE, C. K., LANNERSTAD, M., DE LEEUW, J., *et al.* "Urban consumption of meat and milk and its green and blue water footprints—Patterns in the 1980s and 2000s for Nairobi, Kenya", **Science of the Total Environment**, v. 579, p. 786–796, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.027.

BRASIL. "Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos", **Produto 4 Metodologia para uso consuntivo da Água**, Ministério de Minas e Energia, p. 1–186, 2018.

BRASIL, "Atlas de Energia Elétrica do Brasil". **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª edição ed., 2008. v. 23. p. 132–141. DOI: 10.23925/1980-7651.2019v23;p23-30.

CAI, X., WALLINGTON, K., SHAFIEE-JOOD, M., *et al.* "Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources research", **Advances in Water Resources**, v. 111, n. November, p. 259–273, 2018. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.11.014. .

CARVALHO, F. M. de. "Evaluation of the Brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes", **UFRJ**, n. 3, p. 126, 2017. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponível em: https://www.oreilly.com/library/view/designing-data-intensive-applications/9781491903063/%0Ahttp://shop.oreilly.com/product/0636920032175.do%0Ahttps://www.packtpub.com/web-development/getting-started-webrtc%0Ahttps://www.oreilly.com/library/view/getting-s.

CUNHA, B. S. L. da. **Desenvolvimento de um modelo global de equilíbrio geral computável para avaliação de políticas climáticas: o papel da mudança de dieta**. 2019. 286 f. 2019. DOI: .1037//0033-2909.I26.1.78.

DAMERAU, K., PATT, A. G., VLIET, O. P. R. Van. "Water saving potentials and possible trade-offs for future food and energy supply", **Global Environmental Change**, v. 39, p. 15–25, 2016. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.03.014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.03.014.

DE MELLO, M., YOUNG, A., VILLARDI, H., *et al.* "Biodiesel production by the methylic-alkaline and ethylic-enzymatic routes: Discussion of some environmental aspects", **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 347–357, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.032. .

DI PAOLA, A., RULLI, M. C., SANTINI, M. "Human food vs. animal feed debate. A thorough analysis of environmental footprints", **Land Use Policy**, v. 67, n. March, p. 652–659, 2017. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.06.017. Disponível em:

http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.017.

DIEDERICHS, G. W., ALI MANDEGARI, M., FARZAD, S., *et al.* "Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice", **Bioresource Technology**, v. 216, p. 331–339, 2016. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.05.090. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro**. 2020. Disponível em: https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/.

EPE. "Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo", **Empresa de Pesquisa Energética**, p. 23, 2018. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo.pdf. Acesso em: 06 out. 2019.

FAJARDY, M., KOBERLE, A., DOWELL, N. Mac, *et al.* "BECCS deployment: a reality check", **Grantham Institute Briefing paper**, n. 28, 2019. .

FAO. "Livestock's long shadow - environmental issues and options", **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 3, n. 1, p. 1–377, 2006. DOI: 10.1007/s10666-008-9149-3. Disponível em: ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0701e/a0701e.pdf.

FAO. **State of the World's Forests**. **State of the World's Forests**. [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: http://ccafs.cgiar.org/news/press-releases/agriculture-and-food-production-contribute-29-percent-global-greenhouse-gas.

FAO. **The future of food and agriculture: Trends and challenges.** [S.l: s.n.], 2017.

FAO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition**. Rome, FAO, 2018.

FAO, UN-WATER. **Progress on level of water stress. Gloval baseline for SDG 6 Indicator 6.4.2: Level of water stress:freshwater withdrawal as a proportion of available freshwater resources.** . [S.l: s.n.], 2018.

FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL. "Intended Nationally Determined Contribution: Towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change", **INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION TOWARDS ACHIEVING THE OBJECTIVE OF THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE Pursuant**, v. 9, p. 6, 2015. DOI: http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf. Disponível em: http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published Documents/Brazil/1/BRAZIL iNDC english FINAL.pdf.

FOLLADOR, M. "Potential impacts of climate change on Brazilian agriculture and economy", n. July 2016, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.2.17781.99040. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312086404.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: identificação das áreas prioritárias**. Brasília, [s.n.], 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). "Sustainable food systems Concept and framework", p. 1–8, 2018. Disponível em: http://www.fao.org/3/ca2079en/CA2079EN.pdf.

FRANK, S., HAVLÍK, P., STEHFEST, E., *et al.* "Agricultural non-CO2 emission reduction potential in the context of the 1.5 °C target", **Nature Climate Change**, v. 9, n. 1, p. 66–72, 2019. DOI: 10.1038/s41558-018-0358-8. .

FRICKO, O., PARKINSON, S. C., JOHNSON, N., *et al.* "Energy sector water use implications of a 2°C climate policy", **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, p. 34011, 2016a. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034011.

FRICKO, O., PARKINSON, S. C., JOHNSON, N., *et al.* "Energy sector water use implications of a 2°C climate policy", **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 3, p. 34011, 2016b. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034011.

FUJIMORI, S., HASEGAWA, T., KREY, V., *et al.* "A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation", **Nature Sustainability**, v. 2, n. 5, p. 386–396, 2019. DOI: 10.1038/s41893-019-0286-2. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0286-2.

FUNARBE. "Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industrial e Agricultura Irrigada", 2011. .

GARCIA, D. J., YOU, F. "The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus", **Computers and Chemical Engineering**, v. 91, p. 49–67, 2016. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.03.003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.03.003.

GOUGH, C., FREITES, S. G., JONES, C., *et al.* "Challenges to the use of BECCS as a keystone technology in pursuit of 1,5c", **Global Sustainability**, n. forthcoming, p. 1–9, 2018. .

GULATI, M., JACOBS, I., JOOSTE, A., *et al.* "The Water–energy–food Security Nexus: Challenges and Opportunities for Food Security in South Africa", **Aquatic Procedia**, v. 1, p. 150–164, 2013. DOI: 10.1016/j.aqpro.2013.07.013. Disponível em: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214241X1300014X.

HEDENUS, F., WIRSENIUS, S., JOHANSSON, D. J. A. "The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets", p. 79–91, 2014. DOI: 10.1007/s10584-014-1104-5. .

HOEKSTRA, A. Y. "Virtual Water Trade", **Virtual Water Trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water**, v. 12, n. 12, p. 1–244, 2003. Disponível em: http://www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf.

HOWELLS, M., HERMANN, S., WELSCH, M., *et al.* "Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies", **Nature Climate Change**, v. 3, n. 7, p. 621–626, 2013. DOI: 10.1038/nclimate1789. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1789.

HUMBIRD, D., DAVIS, R. E., TAO, L., *et al.* "Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol", **Renewable Energy**, v. 303, n. May, p. 147, 2011. DOI: 10.2172/1013269. Disponível em: http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/47764.pdf.

HUPPMANN, D., ROGELJ, J., KRIEGLER, E., *et al.* "A new scenario resource for integrated 1.5 °C research", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 12, p. 1027–1030, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0317-4. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0317-4.

IACOBUTA, G., HÖHNE, N., ROELFSEMA, M., *et al.* **Climate mitigation policies in the context of sustainable development**. . [S.l: s.n.], 2018.

IBGE. **Censo agropecuário: resultados definitivos 2017**. . Rio de Janeiro, [s.n.], 2019a. Disponível em: https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/resultados-censo-agro-2017.html.

IBGE. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2019**. . [S.l: s.n.], 2019b.

IBGE. **Pesquisa Industrial Anual**. 2009. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.

IBGE. **Pesquisa Pecuária Municipal**. 2019c. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=sobre.

IBGE. **Pesquisa Trimestral de Abate de Animais**. 2020.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY). "Water Energy Nexus- Excerpt from the World Energy Outlook 2016", **International Energy Agency**, p. 60, 2016. DOI: 10.1021/es903811p. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExcerptWaterEnergyNexus.pdf.

INGARAMO, A., HELUANE, H., COLOMBO, M., *et al.* "Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry", **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 4, p. 487–495, mar. 2009. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.08.018. Disponível em: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652608002138.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change**

2014 Mitigation of Climate Change. 2014.

IPCC. "Chapter 2 : Land-Climate Interactions", p. 1–186, 2019a. .

IPCC. "Chapter 6 : Interlinkages between Desertification , Land Degradation , Food Security and GHG fluxes : synergies , trade-offs and Integrated Response Options Table of Contents", 2019b. .

IPCC. "Special Report on Global Warming of 1.5 °C", n. June, 2018. .

JALAVA, M., KUMMU, M., PORKKA, M., *et al.* "Diet change - A solution to reduce water use?", **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 7, 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/7/074016. .

KANDARAMATH HARI, T., YAAKOB, Z., BINITHA, N. N. "Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1234–1244, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.095. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095.

KLEIN, B. C., CHAGAS, M. F., JUNQUEIRA, T. L., *et al.* "Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries", **Applied Energy**, v. 209, n. August 2017, p. 290–305, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.079. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079.

KÖBERLE, A. C. **IMPLEMENTATION OF LAND USE IN AN ENERGY SYSTEM MODEL TO STUDY THE LONG-TERM IMPACTS OF BIOENERGY IN BRAZIL AND ITS**. 2018. 149 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

KÖBERLE, A. C. "The Value of BECCS in IAMs : a Review", p. 107–115, 2019.

KÖBERLE, A. C., GARAFFA, R., CUNHA, B. S. L., *et al.* "Are conventional energy megaprojects competitive? Suboptimal decisions related to cost overruns in Brazil", **Energy Policy**, v. 122, n. May 2017, p. 689–700, 2018. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.021. .

KRIEGLER, E., LUDERER, G., BAUER, N., *et al.* "Pathways limiting warming to 1.5°C: A tale of turning around in no time?", **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 376, n. 2119, 2018. DOI: 10.1098/rsta.2016.0457. .

LIU, G., YAN, B., CHEN, G. "Technical review on jet fuel production", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 59–70, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.025. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025.

LUCENA, A. F. P., HEJAZI, M., VASQUEZ-ARROYO, E., *et al.* "Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil", **Energy**, v. 164, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.09.005. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218317596.

LUDERER, G., VRONTISI, Z., BERTRAM, C., *et al.* "Residual fossil CO 2

emissions in 1.5–2 °C pathways", **Nature Climate Change 2018 8:7**, v. 8, n. 7, p. 626, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0198-6. Disponível em: http://www.nature.com/articles/s41558-018-0198-6.

LUNDQVIST, J., GRONWALL, J., JAGERSKOG, A. "Water , food security and human dignity - a nutrition perspective", p. 17–59, 2015.

MALEK, K., ADAM, J., STOCKLE, C., *et al.* "Climate change reduces water availability for agriculture by decreasing non-evaporative irrigation losses", **Journal of Hydrology**, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.046. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.046.

MALEKIAN, A., HAYATI, D., AARTS, N. "Conceptualizations of water security in the agricultural sector : Perceptions , practices , and paradigms", **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 224–232, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.026. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.026.

MARENGO, Jose A., NOBRE, C. A., CHOU, S. C., *et al.* "Riscos das mudanças climáticas no Brasil - Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na AmazôniaC. Nobre, J. Marengo, G. Sampaio, R. Betts, G. Kay", **Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Brasil e Met Office Hadley Centre (MOHC) - Reino Unido**, p. 1–56, 2011. .

MARENGO, José A., SOUZA JR, C. **Mudanças Climáticas : impactos e cenários para a Amazônia**. **Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas Fase 2**. 2018.

MARGULIS, S., DUBEUX, S., BURLE, C., *et al.* "Economia do Clima no Brasil: custos e oportunidades", 2010. .

MELLO, M. C. S. de, VILLARDI, H. G. D., YOUNG, A. F., *et al.* "Life cycle assessment of biodiesel produced by the methylic-alkaline and ethylic-enzymatic routes", **Fuel**, v. 208, p. 329–336, 2017. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.014.

MINX, J. C., LAMB, W. F., CALLAGHAN, M. W., *et al.* "Negative emissions: Part 1 - Research landscape, ethics and synthesis", **Environmental Research Letters**, v. submitted, 2017. .

MINX, J. C., LAMB, W. F., MAX, W., *et al.* "Negative emissions — Part 2 : Costs , potentials and side effects OPEN ACCESS Negative emissions — Part 2 : Costs , potentials and side effects", 2018. .

MMA. **Atlântico leste caderno da região hidrográfica**. 2006a.

MMA. **Atlântico sudeste caderno da região hidrográfica**. 2006b.

MMA. **Atlântico sul caderno da região hidrográfica**. 2006c.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. 2006d. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024106.pdf.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental**. 2006e. v. 1. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024629.pdf.

MMA. **Paraguai caderno da região hidrográfica**. 2006f.

MMA. **Parnaíba Caderno Da Região Hidrográfica**. 2006g.

MMA. "São Francisco - Caderno da Região Hidrográfica", p. 148, 2006h. .

MMA. **Tocantins - araguaia caderno da região hidrográfica**. 2006i.

MMA. **Uruguai caderno da região hidrográfica**. 2006j.

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", **Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, p. 188, 2012. .

NETO, A. E. "Gestão dos Recursos Hídricos na Agroindústria Canavieira"

NOOA, Global Climate Report - Annual 2019, 2019

NORTHROP, E., BIRU, H., LIMA, S., *et al.* "Examining the Alignment Between the Intended Nationally Determined Contributions and Sustainable Development Goals", **World Resources Institute**, n. September, 2016. Disponível em: http://www.wri.org/sites/default/files/Examining_the_Alignment_Between_the_Intended_Nationally_Determined_Contributions_and_Sustainable_Development_Goals.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/98AB70E8-5F44-465C-A73F-C4B4F66C4DC6.

ONS. "Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água em bacias do Sistema Interligado Nacional - SIN: Relatório Final - Metodologia e Resultados Consolidados", p. 220, 2005. .

PEARLSON, M. N. "A Techno-Economic and Environmental Assessment of Hydroprocessed Renewable Distillate Fuels by", 2011. .

RANGANATHAN, J., VENNARD, D., WAITE, R., *et al.* "Shifting diets for a sustainable future. Installment 11 of “Creating a Sustainable Food Future”. Working paper", n. April, p. 90, 2016. DOI: 10.2499/9780896295827_08. .

RAU, G. H., WILLAUER, H. D., REN, Z. J. "The global potential for converting renewable electricity to negative-CO2-emissions hydrogen.", **Nature Climate Change**, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0203-0. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0203-0.

RIAHI, K., VUUREN, D. P. Van, KRIEGLER, E., *et al.* "The Shared Socioeconomic Pathways and their energy , land use , and greenhouse gas emissions

implications : An overview", 2016. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009. .

RIDOUTT, B. G., HENDRIE, G. A., NOAKES, M. "Dietary Strategies to Reduce Environmental Impact: A Critical Review of the Evidence Base", **Advances in Nutrition**, n. Vol 8, p. 933–946, 2017. .

ROCHEDO, Pedro R.R., COSTA, I. V. L., IMPÉRIO, M., *et al.* "Carbon capture potential and costs in Brazil", **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 280–295, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.033. .

ROCHEDO, Pedro R.R., SOARES-FILHO, B., SCHAEFFER, R., *et al.* "The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 695–698, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0213-y. .

ROCHEDO, Pedro R.R., SZKLO, A. "Designing learning curves for carbon capture based on chemical absorption according to the minimum work of separation", **Applied Energy**, v. 108, p. 383–391, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.007. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.007.

ROCHEDO, Pedro Rua Rodriguez. "Development of a Global Integrated Energy Model to Evaluate the Brazilian Role in Climate Change Mitigation Scenarios", p. 280, 2016. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/pedro_rochedo.pdf.

RODRÍGUEZ, M. F. C. "Uso de água na produção de etanol de cana de açúcar", p. 178 p., 2010. .

ROE, S., STRECK, C., WEINER, P.-H., *et al.* **How Improved Land Use Can Contribute to the 1.5 degrees C Goal of the Paris Agreement**. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: http://www.climatefocus.com/sites/default/files/CIFF Report.pdf.

ROGELJ, J., POPP, A., CALVIN, K. V., *et al.* "Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °c", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 325–332, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0091-3. .

ROIDT, M., STRASSER, L. **Methodology for assessing the water-food-energy-ecosystems nexus in transboundary basins and experiences from its application: synthesis**. 2015.

ROJAS-DOWNING, M. M., NEJADHASHEMI, A. P., HARRIGAN, T., *et al.* "Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation", **Climate Risk Management**, v. 16, p. 145–163, 2017. DOI: 10.1016/j.crm.2017.02.001. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001.

ROSENZWEIG, C., MBOW, C., BARIONI, L. G., *et al.* "Climate change responses benefit from a global food system approach", **Nature Food**, v. 1, n. 2, p. 94–97, 2020. DOI: 10.1038/s43016-020-0031-z. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s43016-020-0031-z.

SALATI, E., SCHINDLER, W., VICTORIA, D. de C., *et al.* "ECONOMIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL Estimativas da Oferta de Recursos Hídricos no Brasil", 2010.

SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., PEREIRA DE LUCENA, A. F., *et al.* "Energy sector vulnerability to climate change: A review", **Energy**, v. 38, n. 1, p. 1–12, 2012. DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.056. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056.

SCHLOSSER, C., STRZEPEK, K., GAO, X. "The Future of Global Water Stress: An Integrated Assessment", **Earth's Future**, v. 2, n. 8, p. 341–361, 2014. DOI: 10.1002/2014EF000238.Received. Disponível em: http://globalchange.mit.edu/%5Cnhttp://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014EF000238/abstract.

SEMERTZIDIS, T. "Can energy systems models address the resource nexus ?", **Energy Procedia**, v. 83, p. 279–288, 2015. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.182. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.182.

SILVA, E. H. F. M. da, PEREIRA, R. A. de A., GONÇALVES, A. O., *et al.* "Simulação de produtividade futura de soja em Piracicaba-SP com base em projeções de mudanças climáticas", **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, p. 9–17, 2018. DOI: 10.31062/agrom.v25i1.26262. .

SIMONOVIĆ, S. P. "Managing water resources: Methods and tools for a systems approach", **Managing Water Resources: Methods and Tools for a Systems Approach**, v. 9781849771, p. 1–640, 2012. DOI: 10.4324/9781849771917. .

SMITH, M. R., MYERS, S. S. "Impact of anthropogenic CO2emissions on global human nutrition", **Nature Climate Change**, v. 8, n. 9, p. 834–839, 2018. DOI: 10.1038/s41558-018-0253-3. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0253-3.

SMITH, P., BUSTAMANTE, M. "Agriculture, forestry and other land use", **Climate Change 2014: mitigation of climate change**, p. 811–922, 2014. DOI: 10.1104/pp.900074. .

SOCOLOW, R., DESMOND, M., AINES, R., *et al.* "Direct Air Capture of CO2 with Chemicals A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs", **Technology**, p. 1–119, 2011. Disponível em: http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/loader.cfm?csModule=security/getfile&PageID=244407.

SOUZA, L. M. M. de. "Análise da disponibilidade hídrica como um fator de restrição à produção de derivados em refinarias", p. 166, 2018. .

STEHFEST, E., BOUWMAN, L., VAN VUUREN, D. P., *et al.* "Climate benefits of changing diet", **Climatic Change**, v. 95, n. 1–2, p. 83–102, 2009. DOI: 10.1007/s10584-008-9534-6. .

STENZEL, F., GERTEN, D., WERNER, C., *et al.* "Freshwater requirements of large-scale bioenergy plantations for limiting Freshwater requirements of large-scale bioenergy plantations for limiting global warming to 1 . 5 ° C", 2019. .

SZKLO, A., LUCENA, A., SCHAEFFER, R., *et al.* **Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono**. 2017.

TAGOMORI, I. S., CARVALHO, F. M., DA SILVA, F. T. F., *et al.* "Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil", **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2018. DOI: 10.1016/j.ijggc.2017.10.013. .

TARKA, T. J. "Production of zero sulfur diesel from domestic coal - Configurational options to reduce environmental impact", n. December 2011, 2012. Disponível em: http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/refshelf/PubDetails.aspx?Action=View&Source=Main&PubId=428.

TEEB. **TEEB for Agriculture & Food: Scientific and Economic Foundations**. Geneva, UN Environment, 2018. Disponível em: www.teebweb.org/agrifood.

THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODIVERSITY (TEEB). "Measuring what matters in agriculture and food systems", 2018. .

UN. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. **Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019)**. 2019.

UNEP. **Food Systems and Natural Resources. A Report of the Working Group on Food Systems of the International Resource Panel**. [S.l.], Westhoek, H. Ingram J., Van Berkum, S. Özay, L., and Hajer M., 2016.

UNEP. **The Emissions Gap Report 2018**. United Nat ed. Nairobi, 2018. Disponível em: http://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm%0Ahttps://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2018.

USSAMI, K. A. "Interdependência regional no consumo direto e indireto de água nas UGRHIs do estado de São Paulo", 2014. .

VAN DER ZWAAN, B., KOBER, T., CALDERON, S., CLARKE, L., DAENZER, K. K., *et al.* "Energy technology roll-out for climate change mitigation: A multi-model study for Latin America", **Energy Economics**, v. 56, n. February, p. 526–542, 2014. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.11.019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.083.

VAN DER ZWAAN, B., KOBER, T., CALDERON, S., CLARKE, L., DAENZER, K., *et al.* "Energy technology roll-out for climate change mitigation: A multi-model study for Latin America", **Energy Economics**, v. 56, p. 526–542, 2014. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.11.019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.11.019.

VANHAM, D. "Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus?", **Ecosystem Services**, v. 17, p. 298–307, 2016. DOI: 10.1016/j.ecoser.2015.08.003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.08.003.

VÁSQUEZ-ARROYO, E. **Proposta Metodológica pra a Incorporação de Restrições de Disponibilidade Hídrica em Modelos de Otimização da Expansão do Sistema Energético Brasileiro**. 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

VUUREN, D. P. Van, BIJL, D. L., BOGAART, P., *et al.* "Integrated scenarios to support analysis of the food-energy-water nexus", **Nature Sustainability**, 2015. DOI: 10.1038/s41893-019-0418-8. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0418-8.

WALLACE, J. M., & HOBBS, P. V.. Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Elsevier. 2006

WALLIS, P. J., WARD, M. B., PITTOCK, J., *et al.* "The water impacts of climate change mitigation measures", **Climatic Change**, v. 125, n. 2, p. 209–220, 2014. DOI: 10.1007/s10584-014-1156-6. .

WANG, W. C., TAO, L. "Bio-jet fuel conversion technologies", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 801–822, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016.

WANG, W., TAO, L., MARKHAM, J., *et al.* "Review of Biojet Fuel Conversion Technologies", n. July, p. 98, 2016. .

WELLESLEY, L., HAPPER, C., FROGGATT, A. "Changing Climate , Changing Diets Pathways to Lower", n. November, 2015. .

WELSCH, M., HERMANN, S., HOWELLS, M., *et al.* "Adding value with CLEWS - Modelling the energy system and its interdependencies for Mauritius", **Applied Energy**, v. 113, p. 1434–1445, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.083. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.083.

ZULLO JR, J., PINTO, H. S., ASSAD, E. D. "Impact assessment study of climate change on agricultural zoning", **Meteorological Applications**, v. 13, n. S1, p. 69–80, 2006. DOI: 10.1017/S135048270600257X. .