

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – CCSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA – PIMES
DOUTORADO EM ECONOMIA

REINAN RIBEIRO SOUZA SANTOS

ACOPLAMENTO DE MODELO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA BASEADO EM REDE À
MODELAGEM DE INSUMO-PRODUTO: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA E APLICAÇÃO EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS INTERLIGADAS DO AGRESTE PERNAMBUCANO

Recife

2020

REINAN RIBEIRO SOUZA SANTOS

ACOPLAMENTO DE MODELO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA BASEADO EM REDE À
MODELAGEM DE INSUMO-PRODUTO: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA E APLICAÇÃO EM
BACIAS HIDROGRÁFICAS INTERLIGADAS DO AGRESTE PERNAMBUCANO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia (PIMES) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como parte integrante dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Economia na área de concentração Economia do Meio Ambiente.

Orientadora:

Profa. Márcia Maria Guedes Alcoforado de
Moraes

Coorientador:

Prof. Marcelo Pereira da Cunha

Recife

2020

Catálogo na Fonte

Bibliotecária Ângela de Fátima Correia Simões, CRB4-773

S237a Santos, Reinan Ribeiro Souza

Acoplamento de modelo de alocação de água baseado em rede à modelagem de Insumo-Produto: uma proposta metodológica e aplicação em bacias hidrográficas interligadas do Agreste pernambucano / Reinan Ribeiro Souza Santos. - 2020.

236 folhas: il. 30 cm.

Orientadora: Prof.^a Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes e
Coorientador Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha.

Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, CCSA, 2020.

Inclui referências e apêndices.

1. Gestão integrada de recursos hídricos. 2. Modelos de alocação de água. 3. Matriz de Insumo-Produto. I. Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de (Orientadora). II. Cunha, Marcelo Pereira da (Coorientador). III. Título.

336 CDD (22. ed.)

UFPE (CSA 2020 – 012)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PIMES/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE DO DOUTORADO EM
ECONOMIA DE:

REINAN RIBEIRO SOUZA SANTOS

A Comissão Examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o Candidato Reinan Ribeiro Souza Santos **APROVADO**.

Recife, 13/01/2020.

Prof^a. Dr^a. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes
Orientadora

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha
Co-orientador/UNICAMP

Prof. Dr. Gerald Norbert Souza da Silva
Examinador Externo/UFCG

Prof. Dr. Ignácio Tavares de Araújo Júnior
Examinador Externo/UFPB

Prof. Dr. Tácito Augusto Farias
Examinador Externo/ UFS

Prof. Dr. Wilton Bernardino da Silva
Examinador Externo/ UFPE

À minha esposa e aos meus pais.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Carla Santos de Matos Ribeiro, pela paciência, incentivo, suporte e companheirismo, somente com você essa tese se tornou possível.

Aos meus pais, que foram os maiores incentivadores na minha carreira acadêmica e que apesar de não estarem mais aqui conosco sei que assim como eu estão felizes com essa realização. “Eu tenho tanto pra lhe falar, mas com palavras não sei dizer, como é grande o meu amor por você” (Roberto Carlos, 1967).

Ao Prof. Dr. Valdenberg Araújo da Silva pelos conselhos, conversas e amizade, a sua dedicação com a educação mudou a vida de muitos sergipanos, incluindo a minha.

Aos meus irmãos, minhas cunhadas e minhas sobrinhas pela compreensão de que não pude participar de alguns momentos para poder me dedicar a tese.

À minha orientadora Profa. Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes, pelas ideias, paciência, orientação, incentivo e tempo dedicado a construção dessa tese.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Marcelo Pereira da Cunha pelas ideias discutidas, descrição dos problemas e soluções que encontramos juntos.

Aos professores e alunos de doutorado que me auxiliaram nessa tese, especialmente ao Prof. Dr. Gerald Norbert, Profa. Me. Nilena Dias, Prof. Dr. Ignácio Tavares, Profa. Me. Laíse Alves, Prof. Dr. Jorge Viana e Dra. Marjorie Mendes.

Ao Prof. Me. Andrei de Lima e Silva que tanto me ajudou durante esses anos de doutorado.

Ao Me. Alex da Silva Neo pela amizade, conselhos e paciência durante esse período.

Aos funcionários da APAC e COMPESA que me ajudaram na elaboração da base de dados utilizadas nessa tese.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Economia da UFPE, especialmente a Jaqueline da Luz Ferreira que tanto importunei durante esses anos.

Ao povo brasileiro que financia a educação nesse país.

RESUMO

A utilização de modelagens baseadas em redes de nós e links para apoiar a gestão dos recursos hídricos nas decisões de alocação entre os usos nas bacias hidrográficas é frequente, e em geral envolve modelos de otimização e/ ou simulação com critérios hidrológicos. Mais recentemente, modelos de otimização com critério econômico baseados em rede vêm sendo desenvolvidos e aplicados neste nível de bacia, considerando os benefícios econômicos diretos e custos de escassez de diferentes estratégias de alocação. O alcance desses modelos é limitado, pois dizem respeito aos efeitos das políticas de alocação sobre os usuários na bacia e não observa as ligações intersetoriais entre os diferentes setores econômicos e as diversas regiões, desta forma não conseguindo mensurar o impacto econômico em toda a economia de tais decisões. Nesse estudo é proposta uma metodologia de ligação entre uma modelagem de alocação de água baseada em rede - que utiliza a otimização com critério hidrológico para determinar a alocação do recurso entre os diferentes usuários de quatro bacias interligadas - e um modelo de Insumo-Produto, que é considerado um modelo *economy-wide*. Com a ligação torna-se possível calcular os impactos econômicos diretos e indiretos, além do efeito transbordamento de diferentes alocações de água, através de mudanças nos indicadores econômicos e sociais, tais como: valor da produção, número de empregos e PIB. Dessa forma, mensura-se o impacto total em toda a economia de decisões de alocação diferentes. Essa metodologia é aplicada nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Una e Sirinhaém localizadas no Agreste Pernambucano. O modelo de alocação baseou-se em uma rede de nós e links desenvolvida para essa região, e o critério de otimização utilizado foi a maximização do atendimento das demandas requeridas pelos diferentes usuários das quatro bacias. A saída dessa modelagem, ou seja, o resultado das alocações por usuário no ano estudado (2012) foi agregado por setor econômico e região e, então, conectado a uma matriz de Insumo-Produto inter-regional que teve 2011 como ano de referência. Essa metodologia é aplicada em dois diferentes cenários nas bacias interligadas, que diferem por representarem duas estratégias de operação dos reservatórios da região. O cenário referência simula a estratégia de operação efetivamente utilizada pelos gestores diante da seca iniciada em 2012. O cenário alternativo simula uma utilização mais conservadora dos mesmos reservatórios. Os resultados mensuraram impactos nas sub-regiões da área de estudo e em todo território nacional. No cenário referência, o setor mais afetado é o cultivo da cana de açúcar que sofre a maior redução no atendimento das demandas. A plataforma mostra, através da ligação intersetorial, diversos outros setores e regiões afetadas. De fato, o efeito transbordamento nesse cenário foi de 21,8% nas outras regiões do Brasil (resto de Pernambuco, resto do Nordeste e

resto do Brasil). No cenário alternativo outros setores econômicos são afetados diretamente pela redução no atendimento das demandas por água, sendo os mais impactados o setor da pecuária, construção civil e comércio atacadista. O efeito transbordamento nesse cenário foi menor, ou seja, de 19,5% nas demais regiões do Brasil. A diferença central entre os cenários referência e alternativo está na gestão dos reservatórios da área de estudo. No cenário referência a quantidade de água utilizada dos reservatórios é maior do que no cenário alternativo, levando a um maior atendimento dos requerimentos dos usuários de água. Como consequência, os impactos econômicos negativos decorrentes da estiagem no ano estudado (2012) são menores no cenário referência do que no cenário alternativo. No cenário alternativo a redução no atendimento de água bruta foi 34% maior do que no cenário referência, e trinta e oito vezes maior nos impactos econômicos e sociais. Essa diferença deve-se a redução de atendimento de setores econômicos outros, além do “cultivo da cana de açúcar”, em que ocorrem grandes variações do valor da produção, mesmo diante de pequenas reduções na alocação de água bruta. Fica claro em tais resultados o efeito de uma otimização não-econômica, ou seja, os efeitos do “critério do engenheiro” nas decisões de alocação simuladas em ambos os cenários. Ao tentar maximizar o atendimento de todas as demandas diante de uma maior escassez, reduções na alocação são feitas sem considerar os efeitos econômicos. O critério de alocação assim, não diferencia, diante da diminuição na disponibilidade hídrica, os usuários e setores mais ou menos eficientes no uso da água. Ressalta-se que esses diferentes efeitos entre os setores e regiões foram representados pelos valores dos coeficientes técnicos e elasticidades das diferentes regiões e setores econômicos, utilizados na abordagem de ligação entre as metodologias. Por isso é importante uma análise de sensibilidade em tais parâmetros para testar a robustez do modelo. Estratégias de alocação feitas sem considerar os efeitos econômicos levam a impossibilidade de diferenciar usuários e setores em relação à eficiência. Isto resulta em maiores perdas econômicas e sociais, bem como passam incentivos inadequados aos setores e agentes usuários da água. Em regiões escassas em água e com necessidades de transferências crescentes, como é o caso da nossa área de estudo, incentivos adequados, através de instrumentos de gestão fundamentados na teoria econômica, são essenciais para promover um desenvolvimento sustentável. Esse trabalho, ao desenvolver e aplicar uma proposta metodológica de integração de um modelo de alocação baseado em rede com um modelo *economy-wide*, como o de Insumo-Produto, pretende dar uma contribuição importante nessa direção.

Somente foi possível calcular esses impactos econômicos nesse nível de detalhe através da utilização de uma matriz de Insumo-Produto inter-regional. A metodologia proposta nesse estudo é inovadora e pode ser utilizada simulando outros critérios de otimização, inclusive o econômico, em outras regiões, períodos de tempo e níveis de agregação. A integração de modelos econômicos baseados em rede de nós e links a modelos *economy-wide*, permite modelar as disponibilidades e demandas hídricas geograficamente, na decisão de alocação, e ao mesmo tempo mensurar não apenas os impactos econômicos diretos resultantes, como os efeitos indiretos regionais.

Palavras-chave: Gestão Integrada de Recursos Hídricos. Modelos de alocação de água. Matriz de Insumo-Produto. Análise Inter-regional.

ABSTRACT

The use of node and link network-based model to support water management in the allocation decisions between river basin is frequent, and often involves optimization and/ or simulation models with hydrological criteria. More recently, optimization models with network-based economic criteria have been developed and applied at this basin level, considering the direct economic benefits and scarcity costs of different allocation strategies. The scope of these models is limited, since the economic optimum concerns the effects of allocation policies on users in the basin and does not observe the intersectoral links between the different economic sectors and the different regions, thus failing to measure the economic impact across the economics of such decisions. The range of these models is limited because the optimum economic concerns users in the basin and does not observe the intersectoral links between different economic sectors and different regions, thus failing to measure the economic impact on the entire economy. This study proposes a linking between a network-based water allocation model - which uses hydrological criteria optimization to determine resource allocation among different users of four interconnected basins - and an Input-Output model, which is considered an economy-wide model. With the linkage becomes possible to calculate direct and indirect economic impacts and the spillover effect of different water allocations through changes in economic and social indicators, such as: production value, employment and GDP. In this way, the total economy-wide impact of different allocation decisions is measured. This methodology is applied in the Capibaribe, Ipojuca, Una and Sirinhaém basins located in the region Agreste of Pernambuco. The allocation model was based on node and link network-based developed for this region, and the optimization criterion used was the maximization of the demands required by the different users of the four basins. The output of this model, that is, the result of allocations per user in the year studied (2012) was aggregated by region and economic sector and then connected to an interregional Input-Output matrix that had 2011 as the reference year. This methodology is applied in two different scenarios in the interconnected basins, which differ in represent two operating strategies of the region's reservoirs. The reference scenario simulates the operating strategy effectively used by managers in the face of the drought that began in 2012. The alternative scenario simulates a more conservative use of the same reservoirs. The results measured impacts on the subregions of the study area and throughout the national territory. In the reference scenario, the sector most affected is sugarcane, which suffers the largest reduction in meeting demands. The platform shows, through the intersectoral link, several other affected sectors and regions. In fact, the spillover effect in this scenario was 21.8%

in the other regions of Brazil (rest of Pernambuco, rest of Northeast and rest of Brazil). In the alternative scenario, several other economic sectors are directly affected by the reduction in meeting water demands. The spillover effect in this scenario was smaller, i.e. 19.5% in the other regions of Brazil. The central difference between the reference and alternative scenarios is in the management of the reservoirs in the study area. In the reference scenario, the amount of water used in the reservoirs is greater than in the alternative scenario, leading to greater compliance with the requirements of water users. As a consequence, the negative economic impacts resulting from the drought in the year studied (2012) are less in the reference scenario than in the alternative scenario. In the alternative scenario, the reduction in the supply of raw water was 34% greater than in the reference scenario, and thirty-eight times greater in economic and social impacts. This difference is due to the reduction in service from other economic sectors, in addition to the “cultivation of sugar cane”, in which there are large variations in the value of production, even in the face of small reductions in the allocation of raw water. In these results, the effect of a non-economic optimization is clear, that is, the effects of the “engineer criterion” in the simulated allocation decisions in both scenarios. In trying to maximize the fulfillment of all demands in the face of greater scarcity, reductions in allocation are made without considering the economic effects. The allocation criterion, therefore, does not differentiate, in view of the decrease in water availability, the users and sectors more or less efficient in the use of raw water. It is noteworthy that these different effects between sectors and regions were represented by the values of the technical factors and elasticities of the different regions and economic sectors, used in the approach of linking the methodologies. Therefore, a sensitivity analysis on these parameters is important to test the robustness of the model. Allocation strategies made without considering the economic effects make it impossible to differentiate users and sectors in terms of efficiency. This results in greater economic and social losses, as well as passing inadequate incentives to sectors and agents that use water. In regions scarce in water and with growing transfer needs, as is the case in our area of study, adequate incentives, through management instruments based on economic theory, are essential to promote sustainable development. This work, when developing and applying a methodological proposal for integrating a network-based allocation model with an economy-wide model, such as the Input-Output model, aims to make an important contribution in this direction.

It was only possible to calculate these economic impacts at this level of detail through the use of an interregional Input-Output matrix. The methodology proposed in this study is innovative

and can be used by simulating other optimization criteria, including economic, in other regions, time periods and aggregation levels. The integration of economic models based on network of nodes and links to economy-wide models, allows to model the availability and water demands geographically, in the allocation decision, and at the same time to measure not only the resulting direct economic impacts, but also the indirect regional effects.

Keyword: Integrated water resources management. Water allocation models. Input-Output matrix. Interregional analysis.

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustração do modelo conceitual de desenvolvimento sustentável que envolvem a relação social, econômica e ambiental. A interseção dos três círculos representa o nexo de conexão entre a interação. Fonte: Adaptado de Flint (2004).....	24
Figura 2: Divisão do território brasileiro em regiões hidrográficas. Fonte: CNRH (2019).	33
Figura 3: Distribuição percentual da água retirada no Brasil pelos principais usuários de água. Fonte: ANA (2018).....	38
Figura 4: Distribuição percentual da água consumida no Brasil pelos principais usuários de água. Fonte: ANA (2018).	39
Figura 5: Quantidade limite para usos isentos de outorga. Fonte: APAC (2019).	40
Figura 6: Precipitação média por ano entre 1961 e 1990. Fonte: ANA (2005).....	41
Figura 7: Delimitação do semiárido no Nordeste. Fonte: IBGE (2017).....	42
Figura 8: Estações pluviométricas do estado de Pernambuco. Fonte: PERH/98.	42
Figura 9: Disponibilidade hídrica superficial no Brasil, em 2010.....	43
Figura 10: Percentual do volume armazenado comparado a capacidade dos reservatórios equivalentes em alguns estados do Nordeste. Fonte: ANA (2018).	45
Figura 11: Evolução da estimativa do número de poços (em milhares) no Brasil entre os anos de 1958 e 2016. Fonte: (ANA, 2017).	46
Figura 12: Porcentagem de número de poços por mesorregiões de Pernambuco. Fonte: Assis et al. (2012).....	46
Figura 13: Balanço hídrico quantitativo do estado de Pernambuco. Fonte: SNIRH (2019). ...	48
Figura 14: Interface da modelagem WEAP, que é utilizada para descrever a rede de nós e links que representa a hidrologia da região com a infraestrutura de gestão. Fonte: Loucks e Beek (2017).	66
Figura 15: As quatro bacias do estudo de caso. Fonte: HEAL System.	69
Figura 16: Demanda por água bruta pelos diferentes usos em toda a área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.....	71
Figura 17: Em verde a área da bacia do Capibaribe. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe (2010).....	73
Figura 18: Precipitação ao ano em toda a bacia do Capibaribe. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe, 2010.	73

Figura 19: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Capibaribe. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.....	74
Figura 20: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Ipojuca. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.	76
Figura 21: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Sirinhaém. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.....	77
Figura 22: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Una. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.	78
Figura 23: Unidades de análise (UA) das bacias hidrográficas Capibaribe, Ipojuca e Una. Fonte: Heal System.....	80
Figura 24: Ferramenta de geoprocessamento disponibilizada pelo HEAL para delimitação de área incremental entre dois nós de oferta da rede de nós e links. Fonte: Heal System.	82
Figura 25: Atributos do nó de oferta da rede de nós e links. Fonte: Heal System.	83
Figura 26: HEAL System mostra uma caixa com informações de uma outorga presente no layer lido no HEAL. Fonte: HEAL System.....	89
Figura 27: Exemplo de resultado da query do Heal System. Fonte: Heal System.	89
Figura 28: Tela de entrada de atributos para um nó de demanda. Fonte: Heal System.	90
Figura 29: Exemplo dos atributos de um nó de demanda de irrigação no Heal System. Fonte: Heal System.....	91
Figura 30: Quantitativo de nós de oferta por bacia e tipo de nó. Fonte: Heal System e elaborado pelo autor.	92
Figura 31: Esquemático utilizado para a bacia do Capibaribe. Fonte: Elaboração própria do autor.	93
Figura 32: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Capibaribe Fonte: APAC.	94
Figura 33: Esquemático utilizado para a bacia do Ipojuca. Fonte: Elaboração própria do autor.	95
Figura 34: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Ipojuca. Fonte: APAC.	96
Figura 35: Esquemático utilizado para a bacia do Una. Fonte: Elaboração própria do autor. .	96
Figura 36: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Una. Fonte: APAC.	97

Figura 37: Esquemático utilizado para a bacia do Sirinhaém. Fonte: Elaboração própria do autor.	97
Figura 38: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Sirinhaém. Fonte: APAC.	98
Figura 39: Exemplo da ligação entre os nós de demanda e os nós de oferta. Cada nó de demanda (rosa) retira a água de um único nó de oferta (azul). Fonte: Heal System e elaboração própria do autor.	99
Figura 40: Relações entre as regiões em uma matriz de Insumo-Produto inter-regional (com duas regiões). Fonte: Guilhoto (2011) e Ribeiro (2018).	104
Figura 41: Desvio percentual em relação à média de precipitação entre os anos de 2011 a 2014. Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e Asfora et al. (2017).	122
Figura 42: Oferta de água bruta proveniente da precipitação na área de estudo. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe (2010), Plano Hidroambiental da bacia do Ipojuca (2010), Heal System e elaboração própria do autor.	123
Figura 43: Volumes totais iniciais dos 16 reservatórios modelados na rede de nós e links simplificada. Fonte: Elaboração própria do autor utilizando informações da APAC.	123
Figura 44: Demanda atendida e não atendida em 2012 no cenário referência nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Fonte: Elaboração própria do autor.	124
Figura 45: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário referência do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m ³ . Fonte: ANA e elaboração própria do autor....	176
Figura 46: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário referência do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m ³ . Fonte: ANA e elaboração própria do autor....	176
Figura 47: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário alternativo do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m ³ . Fonte: ANA e elaboração própria do autor....	177
Figura 48: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário alternativo do nível do reservatório do Prata em milhões de m ³ . Fonte: ANA e elaboração própria do autor.	177

Lista de Tabelas

Tabela 1: Disponibilidade hídrica m ³ /hab/ano por Unidade Federativa. Em laranja os estados que estão abaixo do mínimo recomendável pelas Nações Unidas. Fonte: Gomes e Barbieri (2004).	44
Tabela 2: Principais Sistemas Adutores do Estado de Pernambuco. Fonte: Atlas das Bacias Hidrográficas de Pernambuco – SECTMA, 2006.	47
Tabela 3: Demanda por água bruta em milhões de m ³ para todas as culturas na região da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da APAC, ANA e FUNARBE.	72
Tabela 4: Classificação da atividade econômica (CNAE 2.0) pela finalidade de uso e cultura irrigada.....	88
Tabela 5: Quantitativo dos nós de demanda por tipo de uso e por bacia. Fonte: Elaboração própria do autor.	99
Tabela 6: Demanda requerida total, vazão alocada, demanda não atendida e percentual não atendido de água bruta por setor econômico e região da matriz de Insumo-Produto no cenário no ano de 2012. Fonte: Elaboração própria do autor.....	125
Tabela 7: Variação de água bruta resultante da solução do modelo de alocação de água e resultante da solução da integração entre as modelagens em cada uma das 71 regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias.....	128
Tabela 8: Impactos no valor da produção em milhares de reais, no número de empregos em postos de trabalho e no valor do PIB em milhares de reais no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.	133
Tabela 9: Variação nos indicadores sociais e econômicos do cenário referência, valor observado na matriz de Insumo-Produto e variação percentual. Fonte: Elaboração própria do autor. ...	134
Tabela 10: Regiões da macrorregião das quatro bacias no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.	136
Tabela 11: Impacto na variação de produção, número de empregos e PIB na região de Ribeirão no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.	138
Tabela 12: Impacto agregado de todas as macrorregiões no valor da produção, número de postos de trabalho e PIB em cada setor da economia devido à redução no atendimento da demanda hídrica no cenário referência.	140

Tabela 13: Níveis dos reservatórios observados em Jan/2012 e Dez/ 2012 e volumes utilizados como restrições mínimas no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor com informações da APAC.....	145
Tabela 14 Demanda requerida total, vazão alocada, demanda não atendida e percentual não atendido de água bruta por setor econômico e região da matriz de Insumo-Produto no cenário alternativo no ano de 2012. Fonte: Elaboração própria do autor.....	146
Tabela 15: Variação de água bruta resultante da solução do modelo de alocação de água e resultante da solução da integração entre as modelagens em cada uma das 71 regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias.....	150
Tabela 16: Impactos no valor da produção, número de empregos e no PIB em milhões de reais no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.	153
Tabela 17: Variação nos indicadores sociais e econômicos do cenário alternativo, valor observado na matriz de Insumo-Produto e variação percentual. Fonte: Elaboração própria do autor.	154
Tabela 18: Regiões da macrorregião da área de estudo os impactos econômicos e sociais no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.	155
Tabela 19: Impacto na variação do valor de produção, número de postos de trabalho e PIB em cada setor da economia no cenário alternativo.....	158
Tabela 20: Variação percentual nos cenários referência e alternativo do valor da produção, postos de trabalho e PIB na macrorregião das quatro bacias. Fonte: Elaboração própria do autor e matriz de Insumo-Produto.	172
Tabela 21: Lista dos 88 municípios em que ao menos algum percentual está em alguma das quatro bacias: Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Fonte: Levantamento realizado pela doutora Marjorie Mendes Guarenghi.	195
Tabela 22: Agregação em regiões da matriz de Insumo-Produto dos 88 municípios da área de estudo.....	197
Tabela 23: Todos os 76 setores econômicos da matriz de Insumo-Produto utilizados nessa Tese	198
Tabela 24: Todos os 288 setores do CNAE 2.0 encontrados na área de estudo e seu correspondente (Tabela 23) na matriz de Insumo-Produto.	199
Tabela 25: Variação na demanda final nos setores e regiões da matriz de Insumo-Produto no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.	206

Tabela 26: Valores da elasticidade de produção com relação a variação da água bruta para as regiões e setores econômicos que utilizam a água bruta na área de estudo. Fonte: Viana (2019).
.....212

Tabela 27: Valores da elasticidade de produção com relação a variação da água tratada para as regiões e setores econômicos que utilizam a água tratada na área de estudo. Fonte: Viana (2019).
.....218

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIMMS.....	Advanced Interactive Multidimensional Modeling System
AMPL	A Mathematical Programming Language
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAPES.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CNARH	Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
CNRH.....	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNARBE ...	Fundação Arthur Bernardes
GAMS.....	General Algebraic Modeling System
GWP	Global Water Partnership
HEAL	Hydro-Economic Allocation
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFPRI	International Food Policy Research Institute
IWRM.....	Integrated Water Management Systems
MCP.....	Marginal Cost Price
MEGC.....	Modelos de Equilíbrio Geral Computável
MIP	Matriz de Insumo-Produto
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU	Organização das Nações Unidas
PERH.....	Política Estadual de Recursos Hídricos
PIB	Produto interno bruto
PIB	Produto Interno Bruto
PIMES	Programa de Pós-Graduação em Economia
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RHN.....	Rede Hidrometeorológica Nacional
SAD	Sistema de apoio à decisão
SADE.....	Sistema de apoio à decisão espacial
SDG	Sustainable Development Goals
SECTMA	Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos
SGBD	Sistema Gerenciador de Base de Dados
SGBM.....	Sistema Gerenciador de Base de Modelo
SGCD	Sistema de Gestão e Geração de Diálogo
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG.....	Sistema de informação geográfica
SIGRH	Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco
SINGREH.....	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRH.....	Sistema de Informações Sobre Recursos Hídricos

SNIRHSistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRHUSecretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
TUPITabelas de Usos e Produção Inter-regionais
UFPBUniversidade Federal da Paraíba
UFPEUniversidade Federal de Pernambuco
UNEP.....United Nations Environment Programme
UNICAMP.....Universidade Estadual de Campinas
WWAPWorld Water Assessment Programme

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	23
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
2.1	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	33
2.2	A DEMANDA POR RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	37
2.3	A OFERTA POR RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	40
2.4	BALANÇO HÍDRICO	47
2.5	ALOCÇÃO NO USO DO RECURSO HÍDRICO	49
2.6	GESTÃO DA DEMANDA DO RECURSO HÍDRICO	52
2.7	EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	54
2.8	MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA APOIAR A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	55
2.9	<i>ECONOMY-WIDE MODELS</i> E OS MODELOS DE INSUMO-PRODUTO PARA APOIO A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	58
2.10	LIGAÇÃO ENTRE O MODELO DE OTIMIZAÇÃO E A MODELAGEM DE INSUMO-PRODUTO	62
2.11	SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO ESPECIAIS (SADE) VOLTADOS A APOIO A DECISÃO NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	64
2.12	HEAL SYSTEM	67
3.	ESTUDO DE CASO, MATERIAIS E METODOLOGIA	68
3.1	ESTUDO DE CASO	69
3.1.1	Bacia do Capibaribe	72
3.1.2	Bacia do Ipojuca.	75
3.1.3	Bacia do Sirinhaém.	77
3.1.4	Bacia do Una.	77
3.2	TRATAMENTO E CONSOLIDAÇÃO DAS OFERTAS E DEMANDAS DE ÁGUA DA ÁREA DE ESTUDO E ALIMENTAÇÃO DA BASE DE DADOS NA PLATAFORMA HEAL	79
3.2.1	A REDE DE NÓS E LINKS DA ÁREA DE ESTUDO	79
3.2.2	Dados de oferta (Retirado do Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES da seção elaborada por Gerald Silva e Alfredo Ribeiro Neto)	79
3.2.3	Dados de Demanda	83
3.3	A REDE DE NÓS E LINKS SIMPLIFICADA	92
3.3.1	Estrutura dos nós de oferta	92
3.3.2	Estrutura dos nós de demanda	98
3.4	MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA SOBRE A REDE DE NÓS E LINKS SIMPLIFICADA	100
3.4.1	Restrições do modelo	102
3.4.2	Função objetivo	103
3.4.3	Problema de otimização linear e solução	103
3.5	MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO INTER-REGIONAL	104
3.5.1	Matriz de Insumo-Produto inter-regional desenvolvida para aa área de estudo.	109
3.6	METODOLOGIA DE LIGAÇÃO DA MODELAGEM DE OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E A MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO	110
4.	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO	121

4.1	CENÁRIO REFERÊNCIA – SIMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA UTILIZADA NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO ENTRE OS USUÁRIOS EM 2012	122
4.1.1	Ligação com a modelagem de Insumo-Produto.....	126
4.1.2	Análise de resultados do cenário referência.....	130
4.2	CENÁRIO ALTERNATIVO – MUDANÇA NA ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS EM 2012.....	143
4.2.1	Ligação com a modelagem de Insumo-Produto.....	149
4.2.2	Análise de resultados do cenário alternativo.	152
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM RELAÇÃO A OUTRAS MODELAGENS.	162
5.	CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DA PESQUISA.....	164
5.1	O MODELO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA	164
5.2	A METODOLOGIA DE LIGAÇÃO PROPOSTA ENTRE A MODELAGEM DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA E A MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO	168
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DE PESQUISA	178
	REFERÊNCIAS.....	181
	APÊNDICE A	195
	APÊNDICE B	206
	APÊNDICE C	212
	APÊNDICE D.....	229

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

A competição pelo acesso ao recurso hídrico está se intensificando com o passar do tempo devido ao crescimento populacional, a degradação na qualidade da água, mudanças climáticas e crescimento das economias. Cada vez mais a quantidade e a qualidade da água são temas de debates na agenda política, principalmente relacionando-as à sustentabilidade do crescimento econômico e à crise do clima¹. Nesse contexto, a gestão da oferta e demanda dos recursos hídricos torna-se determinante no combate à insegurança hídrica, que impacta negativamente na produção dos setores da economia e consequentemente na renda, na garantia de acesso à água doce pela população e na proteção dos sistemas naturais dos lagos, rios e afluentes. De acordo com o WWAP (2012) até 2025, 1,8 bilhão de pessoas viverão em regiões com escassez absoluta de água e dois terços da população viverão em regiões com grande déficit hídrico. Nas próximas três décadas a demanda por água na agricultura pode aumentar em 50% e para uso urbano de 50% a 70% e até 2035 o uso para o setor de energia pode aumentar 85% (*World Bank*, 2016).

Existem quatro formas em que choques na disponibilidade hídrica induzidas por fatores como clima e má gestão podem impactar no desenvolvimento econômico (*World Bank*, 2016): o primeiro é que sendo a água escassa e mal alocada ou usada de forma ineficiente, em geral impacta o crescimento econômico, afetando indicadores como o PIB, renda, desigualdade e até o desempenho na balança comercial; o segundo são os eventos extremos que podem levar a desastres naturais, destruindo diretamente bens e vidas; o terceiro é o impacto de longo prazo relacionados à variação na disponibilidade do recurso, tais como doenças, desnutrição e redução na oferta do número de empregos com consequências em níveis de pobreza e desenvolvimento econômico; e o quarto são os conflitos entre os usuários do recurso.

A sustentabilidade do crescimento econômico depende do cuidado com o meio ambiente e atenção ao aspecto social, sendo nesse contexto a limitação dos recursos naturais e em particular

¹ Eventos de crises climáticas como secas, inundações, ondas de calor e tempestades aumentam cada vez mais em frequência e intensidade. Segundo o relatório recente da ONU (UN-Water, 2019) as consequências para a sociedade dessas crises são a redução da previsibilidade da oferta e demanda por água, afetando também a qualidade do recurso, o desenvolvimento sustentável, a biodiversidade e o direito humano a água e o saneamento. Esse mesmo relatório ainda afirma que as crises estão intrinsecamente relacionadas a água já que mudanças climáticas aumentam a variabilidade no ciclo hídrico o que induz a eventos climáticos extremos.

o recurso hídrico um aspecto fundamental. Segundo Connor (2015), todos os serviços fornecidos pelo recurso hídrico são base para a redução da pobreza e diminuição da desigualdade social, crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. O objetivo 6 do desenvolvimento sustentável do SDG (*Sustainable Development Goals*, ONU) destaca a água limpa e o saneamento para o desenvolvimento sustentável. O crescimento econômico sem sustentabilidade afeta a qualidade e disponibilidade da água comprometendo sua capacidade em gerar benefícios econômicos e agravando o déficit hídrico em uma sociedade onde a demanda por água cresce continuamente.

A Figura 1 é a representação do modelo de desenvolvimento sustentável de Flint (2004). Esses três círculos interagiriam continuamente e a cada tomada de decisão teriam que ser analisados os impactos nas interseções entre os círculos, para assim ser assegurado o crescimento sustentável da economia. Segundo Mugagga e Nabassa (2016), o círculo do desenvolvimento econômico é baseado na melhoria da utilização dos recursos naturais, por exemplo, uma melhor gestão dos recursos, a eficiência na sua utilização e a melhoria da tecnologia. O círculo da integridade ecológica é a compreensão do panorama dos sistemas naturais, que permitam um desenvolvimento econômico que os preservem e o círculo da pobreza e igualdade social é a garantia de acesso aos recursos naturais que crie condições de educação, saúde, renda e empregos para todas as pessoas.



Figura 1: Ilustração do modelo conceitual de desenvolvimento sustentável que envolvem a relação social, econômica e ambiental. A interseção dos três círculos representa o nexo de conexão entre a interação. Fonte: Adaptado de Flint (2004).

Bagatin et al. (2014) destacam que a gestão dos recursos hídricos diante de demandas crescentes, qualidade degradada, aumento das opções de tratamento, incerteza nas ofertas, complexidade das bacias hidrográficas e da infraestrutura hídrica para atendimento e diversidade de usos competitivos é uma tarefa cada vez mais complexa. Assim, é cada vez maior a necessidade de ferramentas, técnicas analíticas e modelagens que apoiem a gestão dos recursos hídricos incorporando toda a complexidade do sistema. Várias ferramentas foram criadas para a análise sistêmica da gestão dos recursos hídricos, destacando-se os modelos de simulação como em Dai e Labadie (2001), métodos de otimização como em Ren et al. (2016), direitos pelo recurso hídrico como em Pahl-Wostl (2007), teoria dos jogos como em Henderson e Lord (1995) e sistemas complexos adaptativos como em Di Nardo et al. (2018) e Abolpour et al. (2007).

Uma estratégia central do que se chama de gestão da demanda é a aplicação dos regimes de alocação dos recursos hídricos entre os diferentes usos concorrentes, que segundo relatório da OECD (2015) consiste em uma combinação de políticas, leis e mecanismos para gerenciar o risco de escassez, diminuir perdas e promover a alocação eficiente entre os setores econômicos. Um regime de alocação bem projetado deve ter como características: ser robusto com um bom desempenho em qualquer tipo de condição de oferta do recurso hídrico e a capacidade de adaptação a mudanças climáticas ao menor custo.

Gallagher et al. (2016) afirmam que regimes de alocação bem desenhados fornecem incentivos para investimentos e inovação que levam a uma utilização eficiente do recurso hídrico, à reutilização da água e à reciclagem. Ao mesmo tempo, têm impactos positivos na proteção ecológica dos rios, lagos e lençóis freáticos, além de promover igualdade social, gerando emprego e renda e acesso a água potável com equidade. Melhorar a eficiência do uso do recurso hídrico por meio de políticas de alocação adequadas é assim o objetivo principal da gestão da demanda, que, portanto, não pode prescindir de modelos econômicos para apoiar o desenho dessas políticas públicas.

Modelagem adequada em nível de bacias hidrográficas para apoiar a decisão nas diversas opções de políticas do recurso hídrico foi descrita por McKinney et al (1999) apud Alcoforado de Moraes (2003). Para os autores, um modelo adequado para subsidiar os órgãos competentes, estabelecer prioridades para a reforma de instituições e determinar incentivos, deveria ter os seguintes objetivos: (1) Poder determinar a efetividade de mecanismos de alocação alternativos, assim como entender os impactos ambientais, de produtividade e de equidade dos mesmos; (2)

Conseguir tratar a alocação do recurso hídrico de uma forma integrada, considerando todas as suas demandas, a saber: agrícola, residencial, industrial, geração de energia, e usos ambientais; (3) Ser suficientemente detalhado para permitir o desenvolvimento de soluções específicas para cada bacia – dadas as grandes diferenças nas instituições, infraestrutura de oferta do recurso hídrico, estrutura da agricultura, e o próprio grau de escassez de água entre as regiões - e ao mesmo tempo na sua estrutura ser generalizável para outras bacias, de forma que possa ser capaz de desenvolver um rol do que seriam as “melhores práticas” para gestão de bacias diante de condições alternativas.

Modelos de otimização são muito úteis nesse processo, pois são capazes de obter a alocação ótima de acordo com diferentes critérios, tanto hidrológicos como econômicos, para um sistema hídrico em questão, incorporando ao mesmo tempo restrições hidrológicas, institucionais e ambientais. Eles têm sido amplamente utilizados, em bacias hidrográficas ou interligações delas para avaliar os diferentes instrumentos de gestão e as alocações resultantes, a partir da comparação com os valores ótimos sob diversos critérios.

Recente relatório do Banco Mundial (World Bank, 2016) sobre os impactos das mudanças climáticas na segurança hídrica aponta, como uma das políticas prioritárias para auxiliar os países e regiões a desenvolver economias resilientes a mudanças do clima e à escassez hídrica, a identificação do ótimo uso da água, através de um melhor planejamento e incentivos adequados.

O desafio mais recente tem sido a integração de tais resultados em nível de bacias hidrográficas com os modelos *economy-wide*, que permitam incorporar medidas de impactos econômicos indiretos regionais. O fato é que, diferentes alocações de água em nível de bacia não apenas levam a impactos diretos sobre os seus usuários, como também têm ligações para frente e para trás relacionadas tanto aos insumos como aos produtos da economia da região. Ademais, os impactos também podem ser diferenciados por estratos sociais para avaliar as consequências sobre estratos da população em situação mais vulnerável (Bhatia et al., 2006).

Os modelos baseados em uma rede de nós e links representam as conexões espaciais das fontes e dos usos dos recursos hídricos, integrando as suas informações hidrológicas e econômicas, sejam em modelos de simulação ou otimização. Eles são importantes para entender as dinâmicas econômicas relacionadas à disponibilidade e alocação dos recursos hídricos nos rios e nas bacias, mas falham em compreender os efeitos indiretos e a abrangência dos impactos econômicos resultantes, mensurados em indicadores como por exemplo: PIB, emprego,

produção dos setores da economia e distribuição de renda (Bekchanov et al., 2017). Os modelos econômicos que procuram compreender os impactos totais na economia resultante da gestão de recursos hídricos, em geral agregam as informações sobre os recursos sem levar em conta limitações físicas e espaciais. Estes são descritos em Bekchanov et al. (2017), que os nomeia de modelos *economy-wide* (“em toda a economia” em tradução livre). Essa modelagem é representada por matrizes de Insumo-Produto e modelos de equilíbrio geral computável (MEGC).

Conforme sugerido pelo mesmo autor, quando ligamos um modelo baseado em uma rede de nós e links a um modelo *economy-wide* capturamos toda a espacialidade e temporalidade dada pela rede de nós e links evitando vieses criados por abordagens não espacializadas. Além disso, tal ligação fornece o entendimento do papel do recurso hídrico nos indicadores macroeconômicos em toda a economia (PIB, emprego e valor da produção). Entre as limitações desta abordagem estão o número grande de cenários da modelagem que podem surgir, devido a consideração da estrutura hídrica, o que pode impedir a identificação em um curto período de tempo dos resultados. Além disso, a ligação é frequentemente aplicada a um único ano representativo em uma periodicidade mensal, deixando de considerar adequadamente a dinâmica das políticas a longo prazo. Outras críticas estão na suposição de um mercado competitivo com concorrência perfeita; e no fato da solução da modelagem ser do ponto de vista de um planejador central onisciente. Quando existe uma forte cooperação entre governo e os usuários de água, parte da comunidade pode não aceitar a nova alocação. Algumas dificuldades ainda são encontradas para a realização da ligação entre as diferentes modelagens, a saber: as fronteiras hidrológicas podem diferir das fronteiras políticas e administrativas (que em geral são obtidos os dados), carência de dados econométricos para parâmetros dos modelos *economy-wide*. Por exemplo, a produtividade marginal da água em atividades econômicas, como a pecuária e a pesca, e de forma mais geral, em qualquer produto não comercializado provindo da natureza e que são usufruídos pela população.

A metodologia apresentada nessa tese propõe uma ligação de um modelo de otimização para alocação de recursos hídricos entre os usuários de bacias interligadas no estado de Pernambuco com uma matriz de Insumo-Produto inter-regional desenvolvida para a mesma área de estudo. A alocação ótima entre os usuários obtida através do modelo de otimização, pode representar diversos critérios e uso de instrumentos de gestão regulatórios e econômicos atuais e potencialmente aplicáveis. Estes valores alocados por usuário são agregados por uso ou setor econômico e regiões da matriz de Insumo-Produto. O resultado assim mostra as variações de

alocação do recurso hídrico entre os setores dependendo das decisões de gestão. Utilizando-se então elasticidades de produção por setor econômico pelo recurso hídrico, obtidas para a área de estudo, calcula-se a variação dos níveis de produção resultantes por setor. A partir das variações dos níveis de produção de cada setor, calcula-se então, os impactos indiretos nos demais setores utilizando a modelagem de Insumo-Produto (MIP). Finalmente, pode-se calcular os impactos diretos e indiretos na economia de diferentes estratégias de alocação, além dos impactos intrarregional e o efeito transbordamento².

A metodologia proposta nessa tese permite o cálculo dos impactos diretos e indiretos na economia de diferentes alocações do recurso hídrico, tais como os valores de indicadores macroeconômicos, como o PIB e o emprego. Esses indicadores, em geral, sofrem maiores impactos com diferentes políticas de alocação, em regiões com escassez³ do recurso hídrico. Em muitos casos, regiões com escassez alocam a água de forma ineficiente, ou seja, à usuários/setores que lhe agregam menor valor. A correção de tais distorções, através de estratégias de alocação eficientes, equitativas e sustentáveis impacta a economia melhorando os indicadores macroeconômicos da região. Ademais garante acesso ao abastecimento público pela população, diminui a desigualdade social e promove o desenvolvimento sustentável. Nessa tese é proposta e aplicada uma conexão de uma modelagem de alocação de águas baseada em rede com uma modelagem de Insumo-Produto. Os desafios de tal ligação são vários. Mencionados por Bekchanov et al. (2017) foram tratados nesta proposta de forma a superá-los: comenta alguns desafios em fazer uma ligação entre essas modelagens: (i) Os limites hidrológicos, requeridos pelo modelo em rede, em geral, são muito diferentes dos limites políticos e administrativos, em que as informações econômicas são dadas. Para diminuir essa discrepância utilizou-se nessa proposta uma matriz de Insumo-Produto em nível municipal; (ii) as ligações geralmente consideram o ano inteiro, o que leva a não incorporação das sazonalidades. Neste estudo o modelo de alocação baseado em rede de nós teve periodicidade mensal considerando assim a sazonalidade das ofertas e demandas na alocação; (iii) a diferença do nível de agregação entre os dois modelos. Na nossa ligação as demandas por usuário do modelo de alocação foram

² Em uma matriz de Insumo-Produto inter-regional o efeito transbordamento é o impacto decorrente da variação de demanda final em uma região nas outras regiões.

³A escassez da água impõe restrições significativas no desenvolvimento social e econômico da região, deteriorando a qualidade de vida.

agregadas pelos mesmos setores econômicos e municípios modelados na MIP, que consistiu em 76 diferentes setores da economia e 75 regiões.

Pernambuco representa bem os problemas hídricos enfrentados por áreas de escassez hídrica. O estado é um dos mais secos do Brasil, com uma disponibilidade hídrica per capita média de 1320 m³/ano, abaixo do limiar de 1500 que caracteriza conflito hídrico e equivalente a 3,5% da disponibilidade nacional per capita média. Partes de Pernambuco como as sub-regiões do Sertão e do Agreste, representam 89% de seu território, mas têm apenas 20% do recurso hídrico disponível no estado, com disponibilidade hídrica per capita variando de 400 a 800 m³/ano, respectivamente. Outro problema recorrente no agreste de Pernambuco é a seca, em 2016 vinte e cinco municípios entraram em colapso e somente dois dos setenta e um municípios da região não decretaram estado de emergência pela crise hídrica (Alcoforado de Moraes, 2017).

A área de estudo escolhida para implementar a proposta metodológica dessa tese são quatro bacias do estado de Pernambuco: bacia do Capibaribe, bacia do Ipojuca, bacia do Sirinhaém e bacia do Una (esta área está contida nas regiões do agreste e litoral de Pernambuco). A bacia do Capibaribe possui aproximadamente 7502 km² de área e possui 661 km de perímetro, passando por 42 municípios do estado. A bacia do Ipojuca possui aproximadamente 3508 km² de área e 784 km de perímetro, passando por 25 municípios do estado. A bacia do Sirinhaém possui aproximadamente 2070 km² de área e 353 km de perímetro, passando ao menos parcialmente por 19 municípios do estado. A bacia do Una possui aproximadamente 5872 km² de área e 598 km de perímetro, passando ao menos parcialmente por 42 municípios do estado.

A região estudada receberá um novo aporte de oferta do recurso hídrico que irá chegar na bacia do Ipojuca⁴ e a previsão de construção de um sistema complexo de dutos⁵ que possibilitará que

⁴ A parte do projeto de Transposição do rio São Francisco conhecida como Eixo Leste fornecerá água para o sertão e agreste de Pernambuco e Paraíba e ainda prevê a construção de um ramal de 70 km que fará a ligação para a bacia do Ipojuca (Castro, 2011). Com vazão de 8 m³/s segundo Relatório Final do Projeto Executivo Ramal do Agreste - Volume 1, outubro de 2013.

⁵ O Sistema Adutor do Agreste de Pernambuco é um conjunto de adutoras que irá garantir o abastecimento de água por todos os municípios do agreste (Asfora et al. 2017). Essa adutora quando construída terá na sua faixa de influência 68 sedes municipais favorecendo uma população de 2 milhões de habitantes da região. A capacidade máxima da adutora será de 7.840 l/s.

Fonte: http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=331:obras-devem-ter-inicio-este-ano&catid=1:latest-news&Itemid=72.

as estações de tratamento de água (ETA) de alguns municípios possam receber água de várias bacias.

Assim a região estudada nessa tese, tendo recebido investimentos de porte em infraestrutura hídrica, que possibilitarão tanto transferências externas à bacia como uma distribuição temporal e espacial de recursos hídricos em toda a área, vai requerer uma gestão de demanda eficaz e modelos de apoio a decisão para orientar as decisões no uso de instrumentos de gestão. É uma região que tem o pior balanço hídrico do país e está sujeita a eventos extremos graves como as recorrentes secas, e que deve receber um aporte significativo de recursos hídricos provindo de transferências externas, em especial do projeto de Transposição do Rio São Francisco.

O objetivo dessa tese assim é propor e aplicar uma metodologia de integração entre um modelo de otimização - que determina a alocação ótima do recurso hídrico entre os diferentes usuários diretos da área de estudo, que consiste nas 4 bacias diante de diferentes critérios - e uma matriz Insumo-Produto com foco na mesma região, e dessa forma obter uma plataforma para mensurar impactos socioeconômicos diretos e indiretos do uso de diferentes estratégias de alocação, em sub-regiões dentro da área de estudo e fora dela, bem como nos diferentes setores da economia.

O período de tempo analisado será o ano de 2012, mês a mês. Dado que tal período inclui um ano de escassez hídrica, devido a uma severa seca na região, tais resultados deverão nos trazer elementos para avaliar os instrumentos de gestão estabelecidos na Política Nacional de Recursos Hídricos, bem como as estratégias de operação dos reservatórios correntemente utilizadas e passíveis de serem aplicadas. Para fazer a mensuração e a comparação dos resultados serão utilizados dois cenários, a serem rodados sobre o mesmo ano e mesmas condições de oferta hidrológica.

O primeiro cenário, a ser chamado de referência, utilizará o modelo de otimização para simular as estratégias atuais de atendimento aos usuários diretos, ao maximizar o atendimento as demandas de todos eles, dando prioridades ao abastecimento humano e incluindo as restrições operacionais dos reservatórios correntemente utilizadas. Neste cenário, devido à seca, reduções no atendimento dos usuários das bacias interligadas no ano de 2012, que foi um ano de escassez, terá os seus impactos econômicos diretos e indiretos mensurados através da plataforma de integração dos dois modelos. Estes serão os resultados associados ao cenário referência.

No outro cenário, estratégias de operação dos reservatórios da região serão alteradas para avaliar de que forma estratégias de alocação e mudanças de operação nos reservatórios teriam

impactado econômica e socialmente a mesma região, com a mesma oferta hídrica, mas sob diferente gestão.

Usando tal proposta metodológica no estudo de caso mencionado, pretende-se responder as seguintes perguntas de pesquisa: 1) Quais os impactos socioeconômicos, diretos e indiretos, nas 4 bacias interligadas da área de estudo e nas regiões fora dela, da redução dos atendimentos às demandas ocorrida devido à seca no ano de 2012 sob a gestão de demanda atualmente utilizada? 2) Como um cenário de uso de uma gestão de demanda diferente (uso de diferentes estratégias de alocação e/ou regras de operação dos reservatórios) impactaria direta e indiretamente do ponto de vista social e econômico em relação à política atual?

Para responder estas perguntas e implementar a plataforma necessária para tal, enumeramos os seguintes objetivos específicos desta tese:

- Construir uma rede de nós e links da água bruta superficial que represente a oferta e a demanda pelo recurso nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una.
- Obtenção, tratamento e consolidação de dados de oferta e demanda de água bruta superficial e entrada desses dados na plataforma *HEAL* para a criação da rede de nós e links, estrutura base do modelo de otimização.
- Agregar dados econômicos aos nós de demanda, integrando-os através da rede de nós e links, não só às suas próprias informações físicas, como às informações dos nós de oferta.
- Desenvolvimento de um modelo de otimização simplificado agregando os principais nós de oferta e demanda de forma a representar os principais demandantes e os principais aportes de água. Estabelecer a função-objetivo e as restrições de forma a simularem a situação da alocação do recurso hídrico para o ano de 2012. Este será o cenário referência.
- A partir do cenário de referência, simular no modelo de otimização, para o mesmo período e oferta hidrológica, alterações nas restrições e função-objetivo, representando dessa forma o uso de estratégias de alocação e regras de operação de reservatórios diferentes das atuais. Este será o cenário de “alteração da operação”.
- Propor e testar uma metodologia de integração dos resultados obtidos pelo modelo de otimização nos dois cenários com a matriz de Insumo-Produto inter-regional devidamente agregada para a área de estudo e os setores econômicos dos usuários da região.

- Analisar, discutir e comparar os impactos socioeconômicos diretos e indiretos intrarregional e o efeito transbordamento, gerados nos dois cenários obtidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O crescimento econômico permanece importante na mitigação da pobreza e segue sendo uma meta apesar da pressão imposta pela sempre crescente demanda por recursos naturais e, especialmente, hídricos. O uso da água para fins urbanos, domésticos e industriais é tipicamente sobrepujado pelo uso agrícola, especialmente em ambientes áridos e semiáridos. À medida que o número de retiradas para fins agrícolas cresce, levam a alterações do fluxo natural dos rios e, simultaneamente, exaurem e poluem os mananciais e aquíferos. Ao mesmo tempo, com a expansão das cidades e de suas economias, os usos urbanos também passam a afetar a quantidade, a qualidade e a disponibilidade hídrica impactando não só a qualidade ambiental, mas também os usos agrícolas existentes e potenciais (Alex Mayer, *personal communication*).

Existe um reconhecimento crescente da pressão que os efeitos combinados de mudança climática, crescimento populacional e urbanização exercem sobre a disponibilidade hídrica. Além disso, espera-se nos próximos anos um aumento na demanda global por produtos agrícolas impulsionada pelo crescimento populacional e pela necessidade de fontes limpas e renováveis de energia. Especialmente em regiões em que a água já é escassa, como o Nordeste do Brasil, o desenho de políticas de alocação de recursos hídricos que incentivem a eficiência no uso e aumente os benefícios econômicos, obtidos a partir desses recursos, para a sociedade é imperativo.

É essencial para os gestores possuírem informação que ajudem na gestão do recurso hídrico principalmente para as regiões com pouca disponibilidade hídrica. São principalmente nessas regiões que os usuários do recurso hídrico que usufruem de uma maior quantidade de água são ao mesmo tempo os que lhe atribuem menor valor, consequentemente a utilizam de forma mais ineficiente. Uma estratégia de alocação do recurso hídrico que incentive um uso racional, deve levar a melhorias sócio econômicas, que devem se refletir em indicadores como o PIB, emprego e distribuição e, ainda, promover o desenvolvimento sustentável.

Uma nova alocação do recurso hídrico somente pode ser comparável ao “status quo” se pudermos comparar os efeitos causados por diferentes estratégias. Para isso modelos e

ferramentas analíticas que possam mensurar os efeitos sócio econômicos de diferentes decisões de alocação do recurso são fundamentais, para que se possa almejar a eficiência no uso do recurso.

Neste capítulo discorreremos sobre os principais conceitos e aspectos teóricos relacionados à alocação do recurso hídrico entre os usuários no Brasil, dado que a metodologia proposta nesta tese é de construção de uma ligação entre modelos, que possa apoiar a decisão na definição de estratégias para promover uma alocação eficiente economicamente.

2.1 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

O Brasil é dividido, segundo a resolução n. 32 de 2003, em doze regiões hidrográficas mostradas na Figura 2 abaixo.



Figura 2: Divisão do território brasileiro em regiões hidrográficas. Fonte: CNRH (2019).

Podemos observar pela Figura 2 que a lógica da divisão hidrográfica do recurso hídrico é diferente da divisão política em estados e, portanto, um órgão estadual não pode ser responsável por toda uma região hidrográfica, já que essa região perpassa mais de um estado, havendo assim necessidade de órgãos nacionais para tal.

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos cabe à entidade que deles tiver o domínio, excetuando-se aqueles casos previstos na Constituição Federal, como é o caso da geração de energia elétrica, cuja gestão é de competência da União, mas deve estar articulada com os Estados onde se localizam os potenciais hidro energéticos. Diante disso, alguns estados elaboraram suas leis de

organização administrativa para o setor, estabelecendo os princípios, os instrumentos e o arcabouço institucional para a promoção do gerenciamento dos recursos hídricos de seus domínios, a chamada Política Estadual de Recursos Hídricos (Carrera-Fernandez, 1999).

A Lei n.9.433, de 08/01/1997 conhecida como Lei das Águas instituiu a política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) com os seguintes objetivos: (i) coordenar a gestão integrada do recurso hídrico; (ii) arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos; (iii) implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos; (iv) planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e (v) promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos (Porto e Porto, 2008).

Como já foi dito, existem dificuldades com o recorte geográfico para a gestão das bacias hidrográficas. E apesar da Lei n.9.433, segundo Machado (2003), a maioria dos estados possuíam, na época, agências de recursos hídricos com objetivos diferentes e muitas vezes conflitantes, não havendo coordenação entre as próprias agências, criadas no estado e também no âmbito nacional.

Assim, a Lei n.9984, de 17/07/2000 criou a Agência Nacional de Águas (ANA) para estimular e contribuir numa gestão integrada dos recursos hídricos. É essa a instituição operacional responsável pela implementação das políticas nacionais de recursos hídricos e que detêm o poder de fiscalização e cobrança pelo uso do recurso em cursos d'água da União (Porto e Porto, 2008).

A lei 9984/2000 determinou que a ANA atuasse em articulação com órgãos e entidades públicas e privadas integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Isto significa que a ANA além de regular o uso de recursos hídricos de competência federal deveria ao mesmo tempo, assegurar que os outros atores estejam fazendo o que lhes cabe para o efetivo funcionamento do sistema (Kelman e Frajtag, 2000).

No caso de Pernambuco, de acordo com uma comunicação interna da Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos (SEINFRA), é na SEINFRA e na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), que conjuntamente com a ANA, desenvolvem-se as atividades voltadas ao planejamento e gestão para alocação do recurso hídrico entre setores econômicos e usuários para as bacias pernambucanas, incluindo as quatro bacias interligadas do nosso estudo de caso.

A APAC foi criada em 26 de março de 2010, através da Lei 14.028. A agência é encarregada de executar a Política Estadual de Recursos hídricos, cabendo-lhe, entre outras competências, regular o uso da água dos mananciais além de realizar monitoramento hidro meteorológico e previsões de tempo e clima. A mesma Lei atribui a APAC a prerrogativa de “promover, coordenar e executar atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico nas áreas de recursos hídricos, meteorologia e mudanças climáticas, podendo, para estes fins, estabelecer termos de parceria, convênios e outros instrumentos similares com instituições de pesquisa e de fomento à pesquisa nestas áreas de conhecimento”.

Em 27 de dezembro de 2018, a Lei Estadual de nº 16.520, estabeleceu a integração da Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos do Estado, onde as principais atribuições da Secretaria Executiva de Recursos Hídricos são as seguintes ações: formular e executar as políticas estaduais de recursos hídricos e de saneamento; coordenar o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco - SIGRH; implantar e consolidar os instrumentos da política estadual de recursos hídricos; promover a gestão integrada, racional e participativa dos recursos hídricos no Estado; promover a universalização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Estado; exercer a gestão dos fundos destinados aos recursos hídricos e ao saneamento; propor, coordenar, gerenciar e executar estudos, pesquisas, programas, projetos, obras e serviços atinentes aos recursos hídricos e saneamento; captar recursos para ações nas áreas de recursos hídricos e saneamento; promover a alocação negociada da água; regular o uso da água, no âmbito dos recursos hídricos estaduais e dos federais nos termos em que lhe forem delegados; e formular e coordenar a política de saneamento na zona rural, de forma sustentável e envolvendo as diversas esferas de Governo. E, devido à reestruturação administrativa do estado de Pernambuco, a APAC passou a ser vinculada à SEINFRA.

A Política Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco, prevista no artigo 220 da constituição, formulada e executada pela Secretaria por intermédio do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco – SIGRH/PE, estabeleceu as seguintes diretrizes (PERH/PE, 1998):

- o aproveitamento racional dos recursos hídricos, em benefício de toda a sociedade e priorizando o uso para abastecimento humano.
- a maximização dos benefícios econômicos e sociais resultantes do aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos e minimização dos impactos ambientais.

- a proteção dos corpos d'água superficiais e subterrâneos.
- o estabelecimento de um sistema de alerta e defesa, visando à segurança e saúde pública quando da ocorrência de cheias e secas.
- o cadastramento de obras hidráulicas e de seus usuários, com vistas ao planejamento;
- a operação da rede hidro meteorológica do Estado.
- a formulação dos Planos Diretores de Recursos Hídricos, por bacia hidrográfica.

Os instrumentos de gerenciamento a ser implantados e consolidados pela Secretaria são (PERH/PE, 1998):

- a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, concedido pelo poder público em forma de concessão (uso de utilidade pública) ou autorização (outras finalidades), independentemente dessa outorga o uso para satisfação das primeiras necessidades da vida de populações difusas, bem como as derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes pelo órgão gestor dos recursos hídricos.
- a aplicação de penalidades por infrações cometidas.
- a cobrança pelo uso ou derivação da água, bem como pela diluição, transporte e assimilação de efluentes de sistemas de esgotos e de outros líquidos poluentes.
- o Sistema de Informações Sobre Recursos Hídricos - SIRH, constituído por uma base de dados informatizada obtida a partir da coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de dados sobre recursos hídricos e fatores intervenientes no ciclo hidrológico.

Tendo a Lei n. 9.433/97 estabelecido como um dos fundamentos da política nacional de recursos hídricos, ser a água um recurso dotado de valor econômico, é natural que dentre os instrumentos de gestão relacionados incluam-se, além dos instrumentos de comando-e-controle ou regulatórios (outorgas e enquadramentos), os instrumentos econômicos, como a cobrança, que são incentivos baseados em mercado. Deve-se ressaltar que algumas modalidades de

instrumentos baseados em mercado não são permitidas pela legislação brasileira, como é o caso de mercados de água, mas poderão vir a ser⁶.

Para uma gestão de recursos hídricos realmente efetiva, o uso destes instrumentos regulatórios e econômicos devem ser parte de uma análise de alocação intersetorial integrada que avalie custos e benefícios, e inclua custos de oportunidade dos usos. É com essas características que as mesmas tornam-se agentes de um real processo de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (*Integrated Water Management Systems - IWRM*), que segundo a definição do *Global Water Partnership* (GWP) encontrada em <https://www.gwp.org/en/gwp-SAS/ABOUT-GWP-SAS/WHY/About-IWRM> : “promove o desenvolvimento e gestão coordenada dos recursos hídricos, da terra e dos recursos relacionados visando o desenvolvimento econômico e social sem comprometer a sustentabilidade e os ecossistemas ambientais.”

2.2 A DEMANDA POR RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

No Brasil, os principais setores usuários de água, segundo a ANA (2018), são: irrigação, abastecimento humano e animal, indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer. Os setores que usam a água de forma consuntiva⁷ disputam entre si as alocações, podendo ter direito a uma maior ou menor quantidade do recurso, dependendo da região, fatores climáticos e distribuição da rede de oferta do recurso hídrico.

⁶ Existe uma consulta pública do Senado Federal para alterar a Lei n.9433. A alteração se daria com a introdução de mercados de água como instrumentos para promover a alocação eficiente do recurso hídrico. A consulta pode ser encontrada na página <https://www12.senado.leg.br/ecidadania/visualizacaomateria?id=131906>.

⁷ Segundo Carvalho et al. (2017) o uso consuntivo são os usos da água em que ocorre retirada no corpo d'água devolvendo somente uma quantidade e/ou qualidade inferior ao corpo hídrico, exemplos de uso consuntivo são: o abastecimento humano e animal, irrigação e indústria. O uso não consuntivo são os usos em que as retiradas de água no corpo d'água são devolvidos na mesma quantidade e qualidade ao corpo hídrico ou ainda que a água sirva somente como veículo para a atividade, isto é, a água não é consumida durante o uso. Exemplos de usos não consuntivos são: hidroelétricas, aquicultura, navegação, turismo e lazer.

TOTAL DE ÁGUA RETIRADA NO BRASIL
(Média Anual)



Figura 3: Distribuição percentual da água retirada no Brasil pelos principais usuários de água. Fonte: ANA (2018).

Observa-se pela Figura 3 que dentre os setores consuntivos de água no Brasil, o que mais retira é o setor da irrigação para a agricultura, seguido pelo abastecimento urbano, devendo-se ressaltar que as taxas de retorno para o manancial podem ser diferentes. A água consumida é a que não retorna à bacia, como por exemplo a água que evapora nas culturas irrigadas.

A Figura 4 abaixo mostra o uso consumido da água em percentual para os diferentes usuários. Comparado ao gráfico da retirada de água podemos ver que a irrigação, além de retirar a maior quantidade de água entre os usuários, também é a que mais consome, isto é, com menor reposição de água para o corpo hídrico. Destaca-se também a utilização da água pelo abastecimento urbano que apesar de retirar muita água retorna grandes quantidades para o corpo hídrico, impactando principalmente na questão da qualidade da água, já que tratamento de esgoto é insuficiente no país.



Figura 4: Distribuição percentual da água consumida no Brasil pelos principais usuários de água. Fonte: ANA (2018).

O principal instrumento de gestão utilizado no Brasil para alocação do recurso hídrico entre os usuários são as outorgas. As outorgas são direitos de uso dados a usuários de diferentes atividades da economia que solicitam a agência reguladora estadual ou nacional - dependendo da dominialidade da bacia hidrográfica - o direito de extrair uma quantidade em um tempo determinado, água superficial ou subterrânea dos rios e afluentes de uma bacia. Se o domínio do corpo hídrico é da União (corpos hídricos como rios e lagos que passam em mais de um estado, ou que sirvam de limite com outros países ou unidades da Federação) a análise e concessão do pedido da outorga é de responsabilidade da Agência Nacional de Água (ANA) segundo a lei nº 9.433/1997. Já se o corpo hídrico pertence a somente um estado ou Distrito Federal as agências estaduais são responsáveis pela análise e concessão do pedido da outorga.

No estado de Pernambuco o pedido de outorga em corpos hídricos estaduais é realizado diretamente à Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC). Segundo a APAC (2019)⁸ são as seguintes as atividades para que devem ser requeridas outorgas: (i) derivação ou captação de água em manancial de águas superficiais (rios, riachos, açudes, reservatórios) para abastecimento público, ou insumo de processo produtivo; (ii) A extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final e/ou insumo do processo produtivo; (iii) uso de recursos hídricos para fins de aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; (iv) a implantação de empreendimentos que demandem a utilização de recursos hídricos; (v) execução de obras ou

⁸ Disponível em <http://www.apac.pe.gov.br/outorga/>, último acesso em 09/09/2019.

serviços que alterem o regime, quantidade e/ou qualidade dos mesmos; (vi) lançamento, em corpos d'água, de esgoto e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final (não implementado até o momento); (vii) outros usos que alterem o regime, a quantidade e/ou qualidade da água do corpo d'água.

Existem ainda limites superiores estabelecidos pela agência, em que não é necessário o pedido de concessão da outorga por serem caracterizados como pequenos demandantes de água, esses limites são mostrados na Figura 5.

		Características
Águas Superficiais	Derivações e captações	Vazão média $\leq 0,5$ l/s = 43 m ³ /dia
	Barramentos de rios intermitentes	Volume de acumulação ≤ 200.000 m ³
Águas Subterrâneas	Usuário doméstico, residencial ou rural	Profundidade do poço ≤ 20 m
		Vazão ≤ 5 m ³ /dia
	Poços destinados exclusivamente à pesquisa, não produtivos, independente da profundidade.	

Figura 5: Quantidade limite para usos isentos de outorga. Fonte: APAC (2019)⁹.

2.3 A OFERTA POR RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A gestão de oferta do recurso hídrico é o recurso disponível para a utilização dos diferentes tipos de usos. A gestão de oferta incorpora atividades voltadas a assegurar disponibilidade hídrica temporal e espacialmente. Inclui não só a construção de infraestrutura hídrica, tais como reservatórios e adutoras, como a operação dessa estrutura de forma a garantir quantidade de água superficial bruta dos corpos hídricos e água subterrânea para os diversos usuários de recursos hídricos.

É essencial para uma gestão eficaz dos recursos hídricos dados da oferta hídrica nas diversas regiões. Grande parte desses dados advêm de monitoramentos feitos através de estações pluviométricas e fluviométricas da Rede Hidro meteorológica Nacional (RHN). A ANA gerencia diretamente no Brasil 4.610 estações sendo: 2.760 pluviométricas (que monitoram as chuvas) e 1.850 estações fluviométricas (que monitoram os níveis dos rios). Através de

⁹ Disponível em <http://www.apac.pe.gov.br/outorga/>, último acesso em 09/09/2019.

medições em estações pluviométricas podem-se gerar dados de precipitação, temperatura e umidade relativa. Através de estações fluviométricas obtêm-se medidas de níveis dos rios.

A análise de dados de chuva é geralmente realizada para um determinado período chamado de ano hidrológico. Segundo a ANA (2018) a precipitação média no Brasil é de 1760 mm, mas reduz-se bastante na região semiárida do Nordeste em que valor médio passa a ser de 500 mm. Para Pernambuco existe uma variação dentro do estado de 400 mm a 2200 mm anuais segundo o Plano Estadual do Programa Água Doce (2010), com 89% do território com valores oscilando entre 400 mm e 1000 mm.

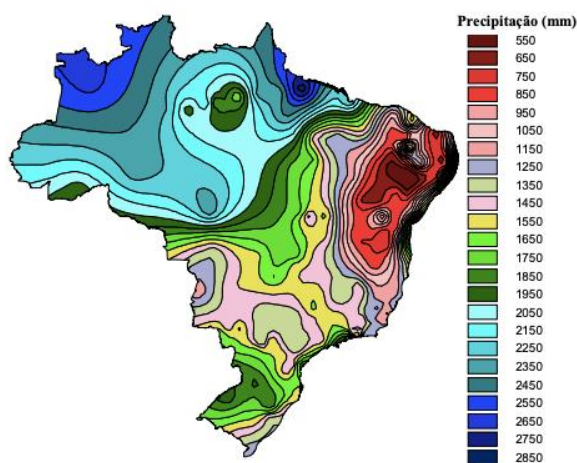


Figura 6: Precipitação média por ano entre 1961 e 1990. Fonte: ANA (2005).

A Figura 6 mostra as precipitações médias em todo o Brasil. Pode-se observar que a região mais crítica está na região do Nordeste, coincidindo com o chamado de polígono das secas. O semiárido de Pernambuco aparece como uma região com baixa precipitação média.



Figura 7: Delimitação do semiárido no Nordeste. Fonte: IBGE (2017).

A Figura 8 mostra a distribuição das estações pluviométricas do estado de Pernambuco.

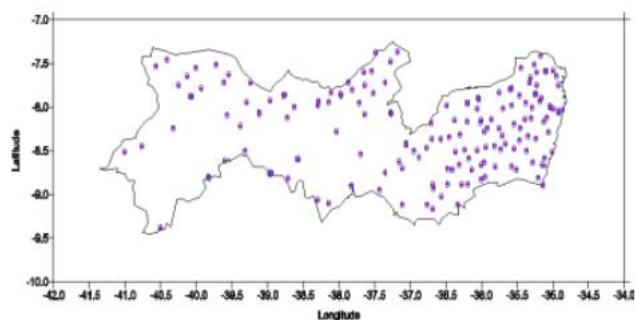


Figura 8: Estações pluviométricas do estado de Pernambuco. Fonte: PERH/98.

O estado apresenta uma disponibilidade hídrica superficial das mais baixas do Brasil, conforme mostrado na Figura 9.

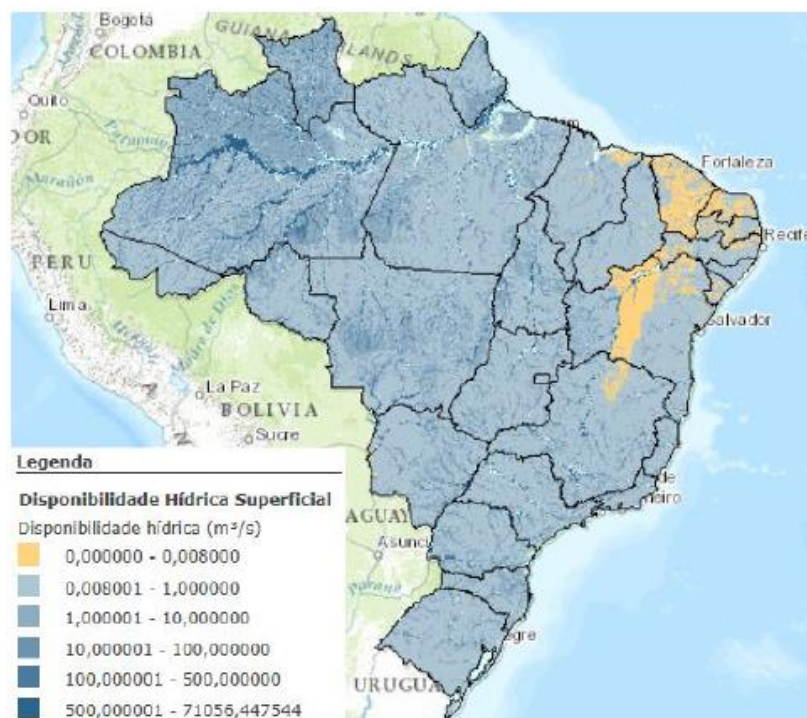


Figura 9: Disponibilidade hídrica superficial no Brasil, em 2010.

Fonte: Gelain e Istake (2015)

Ademais, quando se confronta com a população, resulta na menor disponibilidade hídrica por habitante do Brasil, como pode ser visto na Tabela 1. As Nações Unidas estabelecem como valor razoável para não limitar o desenvolvimento da região o mínimo de 2000 m³/hab/ano. Seis estados estão abaixo do mínimo recomendável pelas Nações Unidas, sendo que Pernambuco apresenta um nível crítico.

Tabela 1: Disponibilidade hídrica m³/hab/ano por Unidade Federativa. Em laranja os estados que estão abaixo do mínimo recomendável pelas Nações Unidas. Fonte: Gomes e Barbieri (2004).

Unidade Federativa	Disponibilidade hídrica (m³/hab/ano)
Roraima	1.747.010
Amazonas	878.929
Amapá	678.929
Acre	369.305
Mato Grosso	258.242
Pará	217.058
Tocantins	137.666
Rondônia	132.818
Goiás	39.185
Mato Grosso do Sul	39.185
Rio Grande do Sul	20.798
Maranhão	17.184
Santa Catarina	13.662
Paraná	13.431
Minas Gerais	12.325
Piauí	9.608
Espírito Santo	7.235
Bahia	3.028
São Paulo	2.913
Ceará	2.436
Rio de Janeiro	2.315
Rio Grande do Norte	1.781
Distrito Federal	1.752
Alagoas	1.751
Sergipe	1.743
Paraíba	1.437
Pernambuco	1.320

Os reservatórios são importantes para a disponibilidade hídrica da região, servem como forma de armazenamento em períodos úmidos e liberam o recurso hídrico em períodos de seca, regularizando a vazão ao longo do rio. Em 2017 existiam 172.837 reservatórios mapeados pela ANA com 290 bilhões de m³ de água armazenados¹⁰ e 620 bilhões de m³ de capacidade agregada de armazenamento (ANA, 2018).

¹⁰ Soma do volume total de todos os reservatórios acompanhados pela ANA em 01/01/2017 (ANA, 2018).

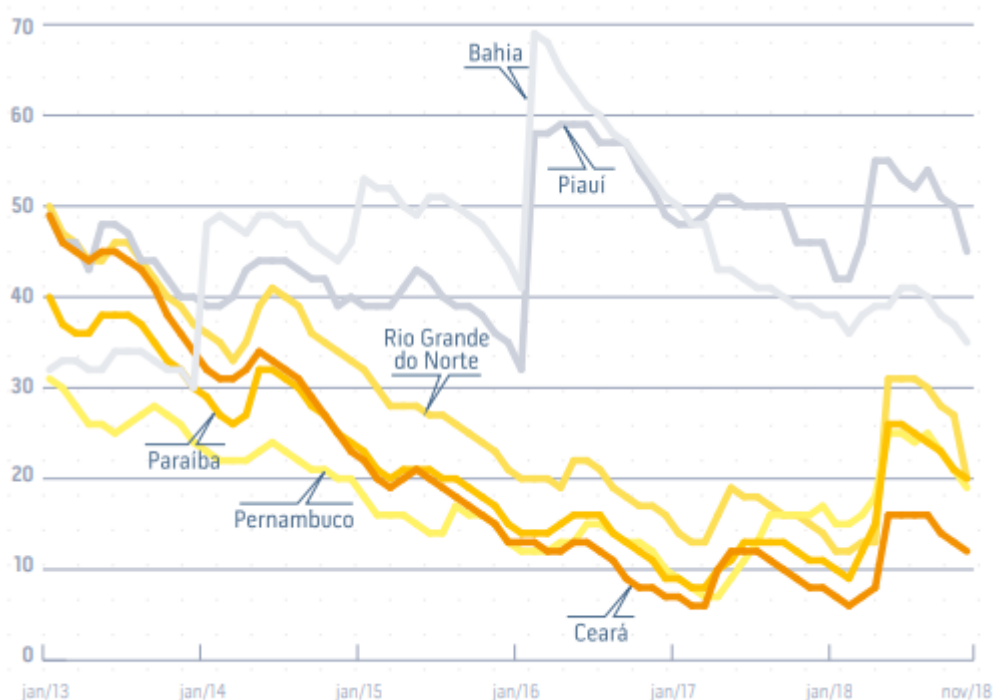


Figura 10: Percentual do volume armazenado comparado a capacidade dos reservatórios equivalentes¹¹ em alguns estados do Nordeste. Fonte: ANA (2018).

A Figura 10 mostra o percentual de armazenamento comparado a capacidade em seis estados do Nordeste. O estado de Pernambuco acompanha os estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará com a liberação do recurso hídrico dos reservatórios no período de janeiro de 2013 a janeiro de 2017 e aumento do armazenamento no período posterior a janeiro de 2017 a novembro de 2018. Assim pode-se notar que os reservatórios são de fato utilizados na gestão dos recursos hídricos através de sua operação de forma a regularizar a oferta do recurso temporalmente.

Segundo o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da ANA¹², existem em Pernambuco 102 reservatórios, sendo que, atualmente, 37 deles, estão com volume abaixo dos 30% da capacidade máxima. A capacidade máxima agregada desses reservatórios é de 7,1 bilhões de m³ com 1,5 bilhão de m³ de volume armazenado atualmente.

¹¹ Reservatórios com mais de 10 milhões de m³ de capacidade de armazenamento.

¹² Utilizando a data 09/08/2019 para a pesquisa.

Parte da água da chuva sobre o território infiltra no subsolo e é armazenado como água subterrânea. Com grande capacidade de armazenamento e resiliência, em períodos de seca tornam esse recurso hídrico importante no período de escassez hídrica (ANA, 2017).

Estima-se que a disponibilidade da água subterrânea no Brasil é de 14.650 m³/s e assim como ocorre com a água superficial, existem regiões de escassez e abundância do recurso hídrico. Em julho de 2018 existiam 302 mil poços cadastrados em todo o território nacional, mas estima-se que o total dos poços existentes são de 1,2 milhão (ANA, 2018).

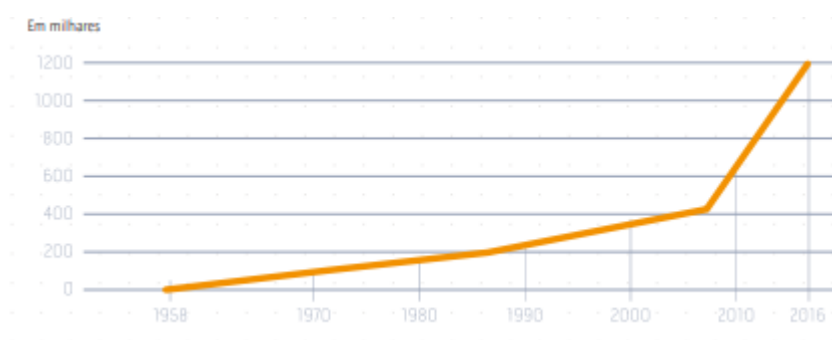


Figura 11: Evolução da estimativa do número de poços (em milhares) no Brasil entre os anos de 1958 e 2016. Fonte: (ANA, 2017).

Em Pernambuco existem aproximadamente 5,5 mil poços cadastrados sendo que o maior número de poços está na mesorregião da Região Metropolitana de Recife como pode ser visto na Figura 12.

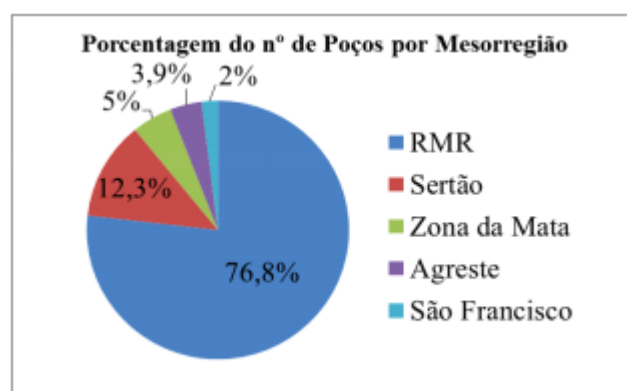


Figura 12: Porcentagem de número de poços por mesorregiões¹³ de Pernambuco. Fonte: Assis et al. (2012).

¹³ RMR representa a mesorregião da Região Metropolitana de Recife.

A utilização dos reservatórios faz a regularização temporal do recurso hídrico, outro fator na infraestrutura hídrica é a regularização espacial que em Pernambuco é realizado através das adutoras. Em todo o estado são aproximadamente 3,4 mil km de adutoras construídas ou projetadas de acordo com a Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA, 2006).

Tabela 2: Principais Sistemas Adutores do Estado de Pernambuco. Fonte: Atlas das Bacias Hidrográficas de Pernambuco – SECTMA, 2006.

Adutora	Extensão (km)
Afogados da Ingazeira	110,0
Afrânio/ Dormentes	180,0
Arcoverde	74,0
Bituri	100,0
Canal do Sertão Pernambucano	578,0
Eixo Leste (trecho situado em Pernambuco)	171,6
Eixo Norte (trecho situado em Pernambuco) Trecho I	143,0
Eixo Norte (trecho situado em Pernambuco) Trecho IV	170,3
Frei Damião	595,0
Gurjaú	23,0
Jucazinho	297,0
Luiz Gonzaga	122,0
Pajeú	425,6
Prata	35,0
Ramal do Agreste	213,8
Salgueiro	188,8

2.4 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é a medida da diferença entre quantidade ofertada e demandada do recurso hídrico. É importante para a gestão saber as estimativas desse quantitativo para analisar as diferenças e a melhor forma de investimento na região. Regiões com balanços desfavoráveis necessitam, tanto de investimentos em desenvolvimento de infraestrutura hídrica para assegurar a oferta temporal e espacialmente (gestão de oferta), bem como estratégias de gestão de demanda para reduzir perdas e incentivar uso do recurso com eficiência econômica e sustentabilidade.

De acordo com recente relatório do World Bank (2016) existem diversas partes do mundo em situação de estresse hídrico como por exemplo, todo o sul da Ásia, o Oriente Médio e o Norte da África. Nessas áreas e outras ao redor do mundo a oferta do recurso hídrico atual não é suficiente para atender a demanda da região, muito menos será suficiente para atender a demanda futura. Segundo o relatório, estima-se que 4 bilhões de pessoas ou (60% da população mundial) residam nessas áreas. O documento aponta ainda como uma das políticas prioritárias para auxiliar os países e regiões a desenvolver economias resilientes à escassez hídrica, a identificação do ótimo uso do recurso hídrico através de um melhor planejamento e incentivos adequados.

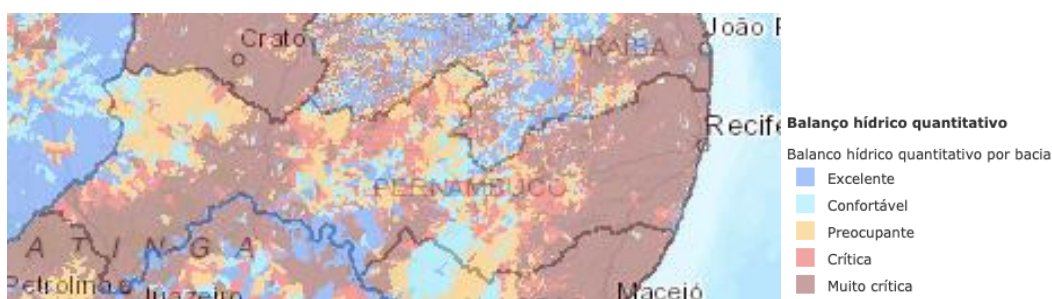


Figura 13: Balanço hídrico quantitativo do estado de Pernambuco. Fonte: SNIRH (2019)¹⁴.

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) fornece em tempo real o balanço hídrico de todo o território nacional. Pode ser observado pela Figura 13 a condição crítica do balanço hídrico de Pernambuco onde a maior parte de sua área está em situação muito crítica.

Utilizando-se as faixas de classificação da *European Environment Agency* e Nações Unidas (SNIRH, 2019) obtêm-se a Figura 13. A mesma apresenta a relação entre a estimativa de consumo total a montante e a disponibilidade hídrica superficial, segundo as seguintes classificações: abaixo de 5% é “Excelente”, de 5 a 10% a situação é “confortável”, entre 10 a 20% a situação é “Preocupante”, entre 20% a 40% a situação é “crítica”, acima de 40% a situação é “muito crítica”.

A baixa potencialidade hídrica do estado de Pernambuco, a menor do Brasil, impõe à gestão pública o desenvolvimento de políticas que tornem o uso do recurso hídrico mais eficiente,

¹⁴ Informação disponível em (último acesso em 20 de julho de 2019): <http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=ac0a9666e1f340b387e8032f64b2b85a>.

reduzam as perdas e priorizem os usos que contribuem para o desenvolvimento social e econômico do estado. Essa estratégia é conhecida como gestão de demanda. Em economias de maturação da água, caracterizadas tanto pelo aumento da escassez quanto pelo aumento da quantidade de transferências de água, essa gestão de demanda, através da otimização da alocação entre os usos, torna-se mais importante (Alcoforado de Moraes et al. 2018, projeto em andamento).

2.5 ALOCAÇÃO NO USO DO RECURSO HÍDRICO

O crescimento populacional, crescimento econômico e a degradação da qualidade do recurso hídrico têm aumentado a quantidade demandada pelo recurso, por outro lado, a incerteza na precipitação (chuvas), infraestrutura hídrica carente de investimento e distribuição geográfica e temporal inadequados, levam a regiões com crescentes déficits hídrico ou balanços negativos. Uma grande parte dos recursos hídricos no globo ainda é usado de forma ineficiente tanto na agricultura, como na indústria e no abastecimento humano. Isto ocorre mesmo em regiões com grande déficit hídrico, onde persistem usos sem gerar benefícios econômicos e/ ou com graves impactos ambientais.

Sem adequados mecanismos de alocação de água, a tendência de crescimento da demanda e incertezas cada vez maiores na oferta, devem levar a cenários crescentes de balanços hídricos negativos com negativos impactos econômicos, sociais e ambientais.

Dinar et al. (1997) relatam quatro mecanismos principais de alocação da água, usando tanto instrumentos regulatórios como econômicos. Os mesmos foram descritos, com vantagens e desvantagens em Freitas e Lopes (2007):

- ***Marginal Cost Pricing – MCP (Precificação baseado no custo marginal):*** Preço da água iguala ao custo marginal da última unidade de água. Vantagem desse mecanismo é a valorização do uso da água como em um mercado competitivo levando a eficiência econômica. A desvantagem está na dificuldade de aplicação que levaria a preços diferentes de acordo com a mudança na oferta e na demanda.
- ***Alocação de água por uma instituição pública:*** É difícil para a população em qualquer lugar do mundo pensar na água como um bem de mercado, geralmente as pessoas pensam na água como um bem público em que todos deveriam ter acesso e não ser precificado a valor de mercado, este pensamento acaba beneficiando indústrias e a irrigação da agricultura que utilizam muito do recurso a um valor muito baixo. A

vantagem desse mecanismo é a tentativa de equidade para os agentes que utilizam o recurso e possibilidade de tratar de investimentos de longo prazo, que seriam difícil de serem abordados por uma empresa privada que vise somente o curto prazo. A desvantagem é que, geralmente, esse mecanismo não tem a vantagem do mecanismo de mercado de alocar com eficiência, levando a má alocação e ao desperdício de água. Outra desvantagem é a não indução a uma utilização racional da água pelos diferentes usuários.

- ***Mercados de água:*** São instituições que facilitam a transação dos direitos de uso pela água e ocorrem em dois níveis. Tem o direito a retirada de água no curto prazo e a perpetuidade do direito a retirada de água. A vantagem desse mecanismo está na alocação do direito da água para o usuário que lhe dá mais valor induzindo ao comportamento eficiente. A desvantagem é que algumas vezes requer a intervenção do governo para mediar condições satisfatórias de mercado, também tem a dificuldade de medição e direito a vazão de retirada. Requer estabelecimento de regulação para o funcionamento já que se admite uma série de falhas nos recursos hídricos em seus diversos usos.
- ***Alocação baseada nos usuários:*** Esse tipo de mecanismo envolve reuniões com as instituições interessadas na utilização da água e tem que ser criados critérios para a sua alocação entre as diferentes instituições. A vantagem desse mecanismo é flexibilidade de mudanças dos critérios de acordo com mudanças de mercado e a aceitação do mercado por esse mecanismo. A desvantagem é que pode criar situações de má alocação do recurso hídrico já que a instituição precisa seguir os critérios estabelecidos, limitando a utilização do recurso pela instituição fora de seu setor de atuação. Esse não é um mecanismo de ajuste rápido do mercado, levando a ineficiência econômica de curto prazo e podendo estabelecer preços diferentes e não eficientes para setores que tenham poder de barganha maior no mercado.

Freitas e Lopes (2007) concluem que o modelo utilizado pelos órgãos brasileiros pode ser caracterizado como o de alocação de água definido pelo poder público, segundo classificação acima. Isto reduziria enormemente o esforço administrativo necessário na sua implementação e manutenção, além de implicar em grande segurança aos usuários já estabelecidos e regularizados. No entanto, ao mesmo tempo, dado que se aceita a evolução natural dos usos de recursos hídricos até o limite pré-definido pelo critério de outorga, a possibilidade de rearranjo

de quantidades alocadas é praticamente inexistente, tanto espacialmente como entre setores usuários.

Kelman e Kelman (2001) analisam quatro mecanismos de alocação recorrentes em períodos de escassez, isto é, quando há déficit hídrico. No racionamento mais selvagem que é a “lei da selva hídrica”, é o mecanismo desprovido de qualquer fundamento econômico, social e jurídico, onde quem está a montante do rio pode pegar a água que quiser em períodos de escassez, assim a escassez de água vai se tornando mais grave a cada ponto a jusante do rio. Esse sistema segundo Kelman e Kelman é o que se observa em regiões onde tem muita escassez, em países em desenvolvimento, incluindo o semiárido nordestino. No racionamento linear quando ocorre o período de escassez cada usuário é cortado no mesmo percentual, por exemplo, todos os usuários seriam cortados em 20% na retirada de água, esse sistema é difícil de ser implementado pela necessidade de um sistema sofisticado de controle. No racionamento cronológico, a prioridade a retirada de água está nas outorgas que primeiro tiveram o direito de retirar a água, assim as outorgas mais novas têm uma probabilidade de racionamento maior em períodos de escassez do que as outorgas mais antigas. No racionamento do benefício econômico a probabilidade de ocorrer racionamento é maior para os usuários que apresentam menor retorno econômico ao uso de uma unidade de água, esse sistema é similar ao *Marginal Cost Pricing* – MCP que falamos acima e as dificuldades são as mesmas: mensuração do benefício e custo econômico unitário de uma unidade do uso da água.

Alcoforado de Moraes (2013) cita o trabalho do IFPRI em parceria com o *The World Bank* (Rosegrant e Biswanger, 1994), que salienta que, quando a economia e a competição por água e o valor da água crescem, os benefícios da realocação da água acompanham este crescimento de forma significativa. São apontados pelos autores uma série de fatores que aumentam o valor da água e, por conseguinte, os benefícios da alocação eficiente: a oferta de longo prazo da água torna-se inelástica; a demanda por água aumenta rapidamente; competição por água entre os usos agrícolas, industrial, urbano e não-consuntivo aumenta; problemas de externalidade, tais como, salinização de águas subterrâneas e da terra, tornam-se mais importantes.

A otimização econômica do uso do recurso hídrico (*World Bank*, 2016) vai requerer as melhores formas de alocar os recursos hídricos escassos entre os setores econômicos, transferindo-os para usos que agreguem um maior valor para a sociedade, ao mesmo tempo assegurando acesso aos menos favorecidos e protegendo o meio ambiente. Para isso, planejamento e regulação especialmente através de instrumentos econômicos, serão importantes. Fazer isso não é trivial,

e dependerá em grande medida da credibilidade das instituições, das leis e especialmente das políticas públicas de águas estabelecidas. Muito dependerá de como tais políticas serão desenhadas e implementadas, ou seja, de como será feita a gestão da demanda (Alcoforado de Moraes et al., 2017).

2.6 GESTÃO DA DEMANDA DO RECURSO HÍDRICO

Segundo Alcoforado de Moraes e Marques (2012) a chamada gestão de demanda explora soluções que promovam a flexibilidade e adaptabilidade necessárias diante do crescente estresse e incerteza na disponibilidade hídrica e necessidade de transferências crescentes de água entre bacias.

A gestão de demanda da água tem como propósito a utilização sustentável do recurso hídrico, produzindo benefício econômico de forma racional, com menor impacto no meio ambiente, impactos sociais positivos como criação de empregos, redução da pobreza e equidade social (Brooks, 2006). Definida como a implementação prática de estratégias destinadas a influenciar a demanda (Savenjie e Zaag, 2002), é caracterizada pela redução do consumo médio de água pelos usuários para garantir uma utilização eficiente e sustentável do recurso hídrico (Brooks, 2002, 2006). A complexidade cada vez maior da gestão do recurso hídrico exige processos de decisão, instituições e tecnologias que garantam o uso racional e conservação da água (Brooks e Brandes, 2011).

Diferente do que ocorria no passado, em que somente o governo estava envolvido na tomada de decisão, é cada vez mais importante o envolvimento de setores e agentes na decisão para melhorar a eficiência do uso como a inclusão de mais setores públicos, agentes da indústria e pequenas empresas, agentes do setor agrícola, universidades e o público em geral (Bourblanc, 2010; OECD, 2011; World Bank, 2006; Tortajada e Joshi, 2013). No Brasil, os comitês de bacias hidrográfica estaduais conta com a participação do governo, sociedade e setores usuários de água. Segundo o relatório da Agência Nacional de Recursos Hídricos (ANA, 2017), o número de comitês de bacias hidrográficas estaduais criados, aumentou de 30 para 223 entre 1997 e 2016, esse aumento ocorreu principalmente a partir da Lei nº 9.433/97 que criou a Política Nacional de Recursos hídricos.

O objetivo principal da gestão da demanda é tratar o recurso hídrico como um recurso econômico ou uma *commodity* com o propósito de incentivar o uso eficiente do recurso pelos

usuários e encontrar um equilíbrio entre oferta e demanda por água. Segundo Xia et al. (2011) esse objetivo pode ser detalhado em três outros (Xia et al. 2011):

- Incentivar a realocação dos setores da economia da região que utilizem os recursos hídricos de forma que seja otimizado pela quantidade utilizada do usuário e distribuição espacial do recurso hídrico.
- Incentivar e orientar os usuários do recurso hídrico a utilizar a água de forma racional de forma a reduzir o consumo e diminuir os custos do usuário.
- Encorajar o uso de equipamentos de tecnologia que ajudem a poupar água, isto é, a utilização de forma mais eficiente e encorajar instalações e tecnologias para tratamento do esgoto, compartilhando assim entre o gestor e os usuários o benefício gerado pela reutilização da água.

Kampragou, 2010, relaciona cinco princípios em que se baseia o gerenciamento da demanda:

- Promover a conservação da água, por exemplo, aplicação e monitoramento de leis.
- Incentivar a economia de água, por exemplo, o uso racional da água através de taxas, penalidades, impostos.
- Investir na economia por água, por exemplo, investir em programas que diminuam a perda em redes de água.
- Aplicar instrumentos econômicos, por exemplo, precificação da água para uso racional.
- Educar os usuários de água e promover capacitação, por exemplo, campanhas publicitárias e acesso à informação dos dados.

Em economias caracterizadas por escassez de água e necessidades de transferências crescentes, como é o caso do Nordeste do Brasil, a gestão de demanda torna-se crítica e o foco deve deslocar-se para a mesma, de forma a obter água “poupada” através de diminuição de perdas de evaporação, redução da poluição e de usos não-benéficos. (Randall, 1981 citado em Alcoforado de Moraes et al, 2011)

Baseado em Bhatia et al. (1995), os autores da UNEP (2011) diferenciam quatro tipos de políticas que podem ser usados para a implementação de uma gestão de recursos hídricos com foco na demanda.

- Habilitar Condições, isto é, efetuar mudanças no ambiente legal e institucional na qual a água é ofertada e usada. Pode incluir a criação de instituições e processos.

- Incentivos baseados em Mercado, são aqueles que influenciam diretamente o comportamento dos usuários na conservação de água, tais como precificação, instituição de mercados, cobrança por poluição e outros tipos de taxas e subsídios;
- Abordagens de comando-e-controle ou Instrumentos regulatórios não-baseados em mercado, tais como cotas, licenças e limites de poluição; e
- Intervenções Diretas, tais como investimentos em programas de conservação ou eficiência, incluindo reabilitação e restauração de infraestrutura de água.

Essa tese de doutorado pretende apoiar a gestão da demanda da água bruta superficial através do desenvolvimento e aplicação de ferramentas analíticas que apreendam a totalidade da complexidade das bacias hidrográficas interligadas e permitam mensurar o quão efetivos são as políticas públicas na indução de uma alocação eficiente e racional do uso da água. A partir da integração de um modelo de otimização baseado numa rede de nós e links à uma matriz de Insumo-produto, poderão ser avaliados diferentes instrumentos de gestão regulatórios e econômicos, atuais e passíveis de serem aplicados através da mensuração dos seus efeitos econômicos e sociais diretos e indiretos.

2.7 EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Imaginar uma região em que o equilíbrio hídrico seja resistente a períodos de escassez e abundância de água, passa pelo incentivo à utilização eficiente do recurso hídrico pelo usuário. Instrumentos econômicos têm um papel importante neste sentido através de planejamento e regulamentação, seja através de precificação ou estabelecimento de mercados. Em ambos os casos, além da eficiência, considerações sobre equidade e justiça social precisam ser considerados para garantir o acesso a água ao abastecimento público doméstico, a utilização de água pelos agricultores mais pobres e salvaguardar condições ambientais. Instrumentos baseados na teoria econômica são muito úteis, pois podem ser aplicados para induzir o comportamento eficiente e ao mesmo tempo garantir a sustentabilidade do recurso.

Existe na população uma falsa crença que políticas de instrumentos econômicos sobre os recursos hídricos gerariam preços exorbitantes para uso da população e que então a água deveria ser um recurso “livre” para ser usado como quiser. Mas nos países onde não se aplicam tais instrumentos o efeito, que de fato ocorre, é justamente o contrário dessa crença. Nesses países são os pobres os mais prejudicados com pouco acesso ou mesmo nenhum ao recurso hídrico e

pagando um preço muito mais alto do que os ricos por cada unidade de água, além de resultar em maiores impactos ambientais negativos (*World Bank*, 2016).

Os instrumentos econômicos e regulatórios são fundamentais para combater o desequilíbrio gerado pela tendência do crescimento ao longo dos anos da demanda por água com uma oferta cada vez mais incerta. Relativo à aplicabilidade pelos gestores de água, a inclusão do critério econômico adiciona novos conceitos teóricos e uma complexidade além da utilizada em modelos de gestão de águas tradicionais, o que muitas vezes dificulta a aceitação de tal abordagem pelos gestores (Harou et al, 2009).

Os modelos de otimização, cujo objetivo é encontrar as mais eficientes estratégias de alocação de água de um ponto de vista econômico, ao mesmo tempo que incorporam restrições hidrológicas e ambientais, têm avançado rapidamente nos últimos anos, e devem impactar significativamente nas abordagens conceituais e práticas de gestão de recursos hídricos, pois podem subsidiar a aplicação de tais instrumentos (Mayer e Munoz-Hernandez, 2009).

Atualmente, a gestão de água realizada por agências federais e estaduais no Brasil na prática subutilizam instrumentos de gestão, inclusive os econômicos, no que se refere ao seu objetivo de incentivar a eficiência para alocar o recurso entre os usuários. Especialmente, durante crises hídricas, em geral no país, os cortes de alocação da água aos usuários têm ocorrido de forma linear. A proposta de modelagem de ligação desenvolvida nessa tese entre as duas modelagens, bem como a plataforma de apoio a decisão que está sendo desenvolvida (Heal System) poderá ajudar a subsidiar a aplicação de vários dos instrumentos de gestão (outorgas, cobrança, enquadramento, planos de recursos hídricos, etc.), ao mensurar os efeitos da aplicação dos mesmos, direta e indiretamente, sobre os principais indicadores econômicos e sociais de uma economia.

2.8 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA APOIAR A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Modelos de otimização para apoio a alocação de recursos hídricos são modelos matemáticos que maximizam ou minimizam uma função-objetivo específica para fornecer valores das variáveis de decisão que são os valores alocados, simultaneamente, em todos os períodos de tempo considerando todos os influxos relativos ao horizonte de tempo em análise. Este horizonte em análise, em geral, não se constitui em longos períodos.

Em modelos de otimização em nível de bacia, as interações hidrológicas entre as principais fontes de água e seus usos podem ser descritas com menos detalhes, dados a complexidade e o

volume dos dados, bem como a especificidade da análise requerida para apoiar decisões de políticas do recurso hídrico. Como exemplo, Wurbs et al. (2005) relata que a maioria dos modelos de otimização calcula os valores das variáveis de decisão, incluindo liberações de reservatórios, de forma a otimizar a função-objetivo sem diretamente considerar as regras operativas do sistema.

As funções-objetivo dos modelos de otimização, em geral, procuram expressar metas de planejamento e gestão, pois assim os resultados podem auxiliar na identificação de políticas ótimas. McKinney et al (1999) citam como uma vantagem desses modelos a capacidade de os mesmos incorporarem valores sociais e econômicos na alocação de recursos hídricos. Os autores citam dois tipos de otimização: a hidrológica (*hydrology-inferred*) nos quais a função objetivo para a decisão na alocação intersetorial é derivada de especificações hidrológicas, e a econômica que usa o princípio da equimarginalidade econômica. A função-objetivo neste último caso é a soma dos benefícios líquidos e estes modelos alocam, então, entre os setores, até que os benefícios líquidos marginais sejam idênticos. Outros critérios como os de equidade e qualidade ambiental podem também ser incorporados aos modelos de otimização através de restrições.

Nessa tese será desenvolvido um modelo de otimização do recurso hídrico. A função objetivo será a maximização¹⁵ do atendimento de todas as demandas, que serão requerimentos fixos pelo recurso entre os diferentes usuários. As restrições serão as de balanço hídrico nos nós de oferta, valores mínimos e máximos dos reservatórios, bem como suas limitantes operativas, e algumas restrições ambientais e institucionais.

Para ser considerado um modelo hidro econômico, a função objetivo deve ser econômica e mensurar benefícios e/ ou custos econômicos associados aos usuários com a alocação do recurso hídrico. As restrições hidrológicas e institucionais são as mesmas. Ao invés de requerimentos fixos dos usuários, são usadas curvas de demanda pelo uso. Modelos que identificam o ótimo econômico são adequados para subsidiar os instrumentos de gestão. Na modelagem hidro econômica temos a maximização do benefício econômico ou a minimização dos custos de escassez dos usuários de água sujeito as referidas restrições. (Draper 2003;

¹⁵ Observe que essa função objetivo não tem critério econômico. Mas a mesma abordagem da modelagem desenvolvida nessa tese pode evoluir com a pesquisa futura para incorporar o critério econômico como forma de alocar o recurso hídrico pelos diferentes usuários.

Pulido-Velasquez et al., 2006, Harou et al., 2009; Alcoforado de Moraes, 2010; Silva, 2017). A alocação ótima do recurso hídrico, seja usando o critério hidrológico ou econômico, pode simular o atendimento de diversas restrições físicas, ambientais e institucionais. Restrições físicas determinam que a alocação do recurso hídrico para os usuários que demandam água precisa ser compatível com a oferta de água em cada nó de oferta da rede de nós e links. Dessa forma, limitações espaciais e temporais ao longo do rio e em toda a bacia podem ser consideradas. Para os reservatórios, o quantitativo de água que pode ser retirado tem que respeitar os limites operativos, como volume mínimo, capacidade para a tomada de água e de vertedouro. Restrições institucionais como a prioridade ao abastecimento humano também pode ser introduzida como restrições no modelo de otimização. Podem, ainda, ser incorporadas restrições ambientais e ecológicas.

O modelo de otimização desenvolvido nesta tese deverá obter a alocação ótima para o ano de 2012, segundo o “critério do engenheiro” – maximização no atendimento as demandas ou minimização do desvio no atendimento - para as demandas consolidadas e validadas na área de estudo atendendo as atuais restrições físicas e institucionais. Este critério se contrapõe ao critério econômico onde a alocação de água é realizada de acordo com a maximização dos benefícios econômicos. O ótimo é então econômico e pressupõe o princípio da equimarginalidade econômica na sua condição de primeira ordem. No “critério do engenheiro” o gestor tenta alocar o máximo de água para todos os usuários de acordo com a disponibilidade hídrica, sem diferenciar os tipos de usos, a menos dos prioritários. Este problema de otimização (“do engenheiro”) simula o uso dos instrumentos regulatórios ou de comando-e-controle, atualmente previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (outorgas, padrões de emissão, limites institucionais, etc.). A nossa solução ótima assim simulará a alocação do recurso hídrico efetivamente realizada no período, para todos os nós de demanda considerados na área de estudo, e será o cenário referência. Reduções no atendimento a demandas dadas por este critério em 2012, que foi um ano com baixa oferta hidrológica, terão seus efeitos econômicos diretos e indiretos mensurados através da MIP e comparados com um outro cenário alternativo, em que se altera a operação dos reservatórios. Dessa forma pode-se ter uma avaliação do impacto econômico e social do uso de diferentes estratégias de alocação usando os atuais instrumentos de gestão na área de estudo.

O cenário alternativo simulará uma nova estratégia regulatória no mesmo período. Para isso, a função-objetivo continuará a mesma, e serão utilizadas outras restrições institucionais ou

ambientais, mais ou menos restritivas, que simulem uma nova estratégia de alocação, mas ainda mimetizando apenas o uso de instrumentos de comando-e-controle.

2.9 MODELOS *ECONOMY-WIDE* E OS MODELOS DE INSUMO-PRODUTO PARA APOIO A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Uma nova alocação do recurso hídrico entre os setores pode ser entendida como um choque na economia, pois as empresas vão produzir de forma diferente, as demandas irão mudar e os preços vão se alterar. Existem várias modelagens que calculam o impacto indireto de um choque na economia (Malik, 2008), sendo as principais: (a) a modelagem de Insumo-Produto, (b) a matriz de Contabilidade Social e (c) o modelo de Equilíbrio Geral Computável. A diferença entre essas modelagens é a forma que um choque é assimilado na economia. Nem sempre a ferramenta mais sofisticada deve ser utilizada, mas sim a ferramenta que possibilite calcular os impactos que gostaríamos de ser estudados na modelagem. Quando os preços são assumidos como fixos a modelagem utilizada é a modelagem de Insumo-Produto ou a matriz de Contabilidade Social e todo o ajustamento ocorrerá através das mudanças em quantidades. Quando se assumem mudanças de preços, a modelagem utilizada é a do Equilíbrio Geral Computável. Nessa abordagem, uma mudança na demanda de um setor implicará em uma mudança nos preços relativos, determinando efeitos de substituição entre insumos e produtos com realocação de fatores entre os setores da economia (Malik, 2008).

Esta tese está inserida em um projeto de pesquisa que pretende integrar modelos de otimização baseados em rede a modelos *economy-wide* como os MIP's e os MEGC. A nossa proposta, dentro deste contexto, é a de integrar um modelo de otimização com um MIP e por isso será descrita de forma mais detalhada a metodologia de Insumo-Produto para que sejam avaliadas as possibilidades de integração posteriormente.

A Matriz de Insumo-Produto (MIP) é uma “fotografia” das ligações entre os setores da economia para um determinado período mostrando o quanto cada setor fornece de insumo para os outros setores e produção do bem final. Essa fotografia é representada tipicamente por uma matriz que estabelece, para uma determinada região e por um determinado período de tempo, como ocorreram a relação entre esses setores. As matrizes de Insumo-Produto descrevem a interdependência e fluxo de moeda entre os diferentes setores de uma economia (Camargo et al., 2008). A teoria original da modelagem de Insumo-Produto que relaciona para uma

determinada região aos setores dessa economia no formato de uma matriz, foi feita inicialmente por Leontief (1928, 1936).

Todos os dias cada setor da economia utiliza uma função de produção própria que transforma insumos em produto. Os insumos desse setor podem ser produtos de outros setores e o seu produto pode ser insumo para os outros setores existindo, assim, uma ligação entre os setores da economia.

Suponha uma economia com n setores. É possível construir as equações de produção a partir do propósito produtivo (Miller e Blair, 2009, p. 19) na forma:

$$X_1 = Z_{1,1} + Z_{1,2} + \dots + Z_{1,n} + Y_1$$

$$X_2 = Z_{2,1} + Z_{2,2} + \dots + Z_{2,n} + Y_2$$

$$X_n = Z_{n,1} + Z_{n,2} + \dots + Z_{n,n} + Y_n$$

Onde: X_i é a quantidade total produzida pelo setor i da economia.

$Z_{i,j}$ é a quantidade do produto do setor j que foi utilizado como insumo pelo setor i .

Y_i é a demanda final do bem i .

A matriz $A = [a_{i,j}]$ chamada de matriz de coeficiente e construída a partir da MIP é dado por:

$$a_{i,j} = \frac{Z_{i,j}}{X_j}$$

onde X_j é a produção total do setor j e $Z_{i,j}$ é o insumo do setor i utilizado no setor j .

Na forma matricial a estrutura de fluxo entre os setores da economia pode ser descrita como:

$$Y + AX = X \quad (1)$$

onde X e Y são vetores coluna. E A é uma matriz quadrada. A produção total da economia X é a soma dos bens de consumo intermediário Z e dos bens da demanda final Y .

Da equação (1) temos:

$$(I - A)^{-1}Y = X \quad (2)$$

A matriz $(I - A)^{-1}$ é chamado da matriz inversa de Leontief e é a forma usual da aplicação da MIP que calcula a partir de um choque na demanda final Y um novo vetor de produção total da economia que atende essa demanda final. O modelo estático de Insumo-Produto utiliza a matriz inversa de Leontief para calcular a partir de uma estrutura de demanda final, qual seria o nível de produção total, absorção de trabalho, volume de importações, entre outros, que passaria a existir na economia (Guilhoto, 2011).

Outra forma de interpretar a equação (1) é na forma:

$$X = Y + AY + A^2Y + A^3Y + \dots = (I - A)^{-1}Y$$

Isto é, a produção total X iguala a demanda final Y mais os bens utilizados para produzir a demanda final Y , que é AY ; mais os bens utilizados para produzir AY , que é A^2Y ; mais os bens utilizados para produzir A^2Y , que é A^3Y e assim por diante.

Dessa forma podemos ver mais uma vez como a matriz de Insumo-Produto funciona com as interações. A produção total dessa economia é o que foi produzido para atender a demanda final, mais o que foi produzido para ser utilizado como insumo para a produção da demanda final, mais a produção dos insumos que foram utilizados para produzir os insumos da demanda final e assim por diante.

A equação (2) é a forma mais usual de utilizar a matriz de insumo produto. Mas essa equação matemática pode ser utilizada na sua outra forma direta

$$Y = (I - A)X.$$

Existem vários métodos para calcular a matriz de Insumo-Produto: os métodos com pesquisa, os semi-pesquisa e os métodos sem pesquisa (Hubacek et al., 2010). O método com pesquisa possui um custo alto e exige muito tempo de estudo mas possui maior precisão (McMenamin e Haring, 1974; Miller e Blair, 1985), os métodos com semi-pesquisa e sem pesquisa possuem custo menor mas também menos precisão e são muito utilizados na adaptação de matrizes nacionais com o objetivo de representar as peculiaridades regionais, por exemplo: Czamanski e Malizia, (1969), Jensen et al., (1979) e Schaffer, (1976),

Torezani et al., (2016) citam alguns exemplos de matriz de Insumo-Produto (MIP) feito para estados brasileiros: Guilhoto et al. (2010) construíram a MIP para todos os estados do Nordeste e para o resto do Brasil; Palermo et al. (2010) criaram a MIP inter-regional para o Rio Grande do Sul e o resto do Brasil. Também já foram construídas MIP para alguns estados em específico,

como para Minas Gerais (Ribeiro et al., 2013), Mato Grosso (de Figueiredo et al., 2014) e Paraná (Kalluf e Kureski, 2015).

A incorporação de um problema de meio ambiente com a modelagem de Insumo-Produto iniciou-se com Cumberland (1966) e Daly (1968). Leontief (1970) apresentou uma versão estendida da modelagem de Insumo-Produto com novas linhas e colunas para incluir insumos provenientes do processo produtivo. Uma matriz estendida de Leontief para incluir a linha de água bruta é vista em Velázquez (2006), Alcántara e Padilla (2009) e Hubacek (2010). A utilização de uma matriz de Insumo-Produto para o apoio da gestão do recurso hídrico e desenvolvimento sustentável pode ser visto em Ke et al. (2016), Blanco e Thaler (2014) e Boudhar et al. (2017).

A principal crítica na utilização de uma matriz de Insumo-Produto para apoiar a decisão do gestor do recurso hídrico é a agregação das dimensões espacial e temporal do problema. A agregação da dimensão espacial não considera as peculiaridades do sistema de infraestrutura hídrica da região, assim as alocações da modelagem podem ser impraticáveis ao gestor. A agregação temporal não considera a sazonalidade típica do recurso hídrico, assim as alocações podem ser inatingíveis em determinado período do tempo. Bekchanov et al. (2017) afirmam que em um contexto mais geral da utilização de um modelo Equilíbrio Geral Computável, a literatura (Robinson et al., 2012; Dixon et al., 2011) tenta incorporar a dimensão espacial e temporal do problema utilizando modelos hidrológicos, mas a complexidade de informações e dados que são necessários nesse tipo de modelagem trazem desafios importantes¹⁶.

Bekchanov et al. (2017) ainda citam as seguintes críticas: a matriz de Insumo-Produto utilizada, geralmente considera a agregação da conta agrícola (Bekchanov et al., 2014), mas geralmente a agricultura é o principal consumidor de água da região e, portanto, para um melhor resultado, o cálculo do impacto de uma nova alocação do recurso deveria ser realizado considerando a desagregação do setor. Por último, as distorções do valor da água que geralmente é

¹⁶ Nessa tese essa crítica não é aplicável já que exigiria a incorporação de um modelo hidrológico a uma matriz de Insumo-Produto. A abordagem utilizada aqui é uma ligação entre essas modelagens, com a saída do modelo hidrológico servindo de entrada para calcular os impactos na economia por uma matriz de Insumo-Produto. Assim temos a complexidade das dimensões espacial e temporal analisadas no modelo hidrológico e o cálculo do impacto em toda a economia utilizando uma matriz de Insumo-Produto.

subvalorizada ou mesmo não atribuído valor algum é um desafio na modelagem de Insumo-Produto.

2.10 LIGAÇÃO ENTRE O MODELO DE OTIMIZAÇÃO E A MODELAGEM DE INSUMO-PRODUTO

A análise fornecida pelo modelo de Insumo-Produto fornece uma visão mais abrangente dos impactos entre os setores através das ligações setoriais (Lakshmanan, 2011; Rey, 2000), mas como citado acima, há limitações em usar um modelo *economy-wide* aplicado de forma isolada para apoiar a gestão de recursos hídricos.

A ideia central da ligação da modelagem de Insumo-Produto com o modelo de otimização é não só conseguir mensurar os efeitos diretos e indiretos na economia de diversas políticas de alocação do recurso hídrico de uma forma agregada, mas além disso, poder incorporar limitações físicas espaciais e temporais, possíveis através de um modelo baseado numa rede de nós e links, que pode representar os principais nós de oferta e demanda da área de estudo.

Bhatia (2006) utilizou vários modelos de otimização de alocação do recurso hídrico de diversas bacias do estado de Tamil Nadu na Índia e conectou-os a uma matriz de Contabilidade Social, construída a partir de uma Matriz de Insumo-Produto do mesmo estado. Avaliou, através desta ligação, instrumentos de gestão mais ou menos flexíveis, mensurando os seus impactos econômicos e sociais, especialmente entre as classes sociais mais baixas. Mostrou que a utilização de instrumentos de gestão mais flexíveis trouxe um impacto positivo no meio ambiente e no crescimento econômico do referido estado. Ademais, concluiu também que na utilização de instrumentos de gestão mais flexíveis, a cada 100 rúpias de valor adicionado gerados pela tal política mais flexível, outras 94 rúpias foram geradas como efeitos indiretos e induzidos. Jonkman et al. (2008) calcularam para a Holanda o custo diretamente gerado por inundações dado por um modelo hidrodinâmico e os custos indiretos associados via matriz de Insumo-Produto. Outros estudos que analisam a relação dos setores econômicos com o insumo água analisando quais setores utilizam de forma direta a água e quais setores utilizam de forma indireta são Boudhar et al. (2017), Llop (2008) e Dietzenbacher e Velázquez (2007).

Ao integrar a MIP a um modelo de otimização, baseado numa rede de nós e links, portanto espacialmente conectado, poderão ser simulados os efeitos diretos e indiretos de instrumentos de gestão e regras operacionais que levam a diferentes alocações de água bruta para cada um dos demandantes pelos recursos hídricos. Ao agrupar tais reduções ou acréscimos do insumo

primário por setor econômico, município e nó de oferta, podemos ter uma variação agregada no insumo primário a ser conectada à modelagem de Insumo-Produto. Dessa forma, poderá ser mensurado além do impacto econômico direto da redução de água bruta, o impacto indireto da água na economia usando diversos indicadores. Ao contrário de uma aplicação usando unicamente a MIP, tal integração poderá avaliar estratégias de alocação realistas e factíveis, tanto temporal quanto espacialmente dado que é baseada numa rede de nós e links.

Os impactos diretos resultam em impactos indiretos da economia, sendo a magnitude desses impactos, no entanto, dependente da força de ligação entre os diferentes setores estudados. O uso de multiplicadores é a abordagem tradicionalmente utilizada para calcular a magnitude dessas ligações intersetoriais segundo Bhatia et al. (2008). Os multiplicadores são medidas que refletem a grandeza dos efeitos totais (diretos e indiretos) comparado aos efeitos diretos, por exemplo, um multiplicador de 1,7 significa que para cada real de impacto direto na economia geram 0,7 reais de impacto indireto.

Quando ocorre a variação da demanda final da economia os setores são afetados e os impactos no valor da produção, número de empregos e no PIB podem ser divididos em impactos diretos e indireto.

Um outro grande consumidor da água bruta na área de estudo é o abastecimento público, isto é, o setor de produção da água tratada que é destinada para os centros urbanos e rurais para abastecimento humano. Setores de comércio e serviços são atendidos por este setor. Em Pernambuco, são prefeituras e a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), que são responsáveis pela captação da água bruta, produção de água tratada e distribuição através da infraestrutura hídrica do estado. No total são 169 sistemas de abastecimento de água¹⁷ diferentes que abastecem todos os municípios do Estado, sendo que 156 são de responsabilidade da COMPESA¹⁸. A distribuição da água tratada por todos esses sistemas e os impactos econômicos associados não serão representados através de uma rede física, dada a complexidade da mesma, associada a já existente rede de distribuição da água bruta. No entanto, os efeitos econômicos de sua distribuição poderão ser mensurados usando o setor de econômico

¹⁷ Um sistema de abastecimento de água é um sistema que leva a água da bacia até o consumidor final, incluindo o meio de transportar a água e sua purificação.

¹⁸ Existe ainda a complexidade que um sistema pode abastecer diversos municípios e além disso existem municípios que são abastecidos por diversos sistemas. Portanto é difícil incorporar uma rede que represente a distribuição da água tratada na região.

de águas e esgoto existente na matriz de Insumo-Produto. Através da MIP pode-se simular a distribuição da água tratada proveniente das diversas estações de tratamento da COMPESA, estas sim usuárias de água bruta, recebendo quantitativos diversos, a depender das estratégias de alocação, do período e de sua localização espacial.

Assim, a ligação metodológica proposta nessa tese entre a modelagem de otimização da alocação dos recursos hídricos baseada numa rede de nós e links, e a modelagem da matriz de Insumo-Produto possibilitará calcular impactos diretos e indiretos na economia, os impactos intrarregionais e o efeito transbordamento de diversas estratégias de alocação da água bruta, considerando a complexidade das dimensões espacial e temporal do problema de alocação. Isto significa que as alocações a serem avaliadas são factíveis e implementáveis em políticas de gestão de recursos hídricos, através dos atuais instrumentos de gestão. Além disso, a MIP, assim disponibilizada e conectada à rede de nós e links pode ser usada para obter uma matriz de Contabilidade Social que poderá prover a mensuração dos impactos nas diferentes classes sociais da economia, visando assim observar o impacto de diferentes estratégias de alocação nas classes sociais mais vulneráveis.

2.11 SISTEMAS DE APOIO A DECISÃO ESPECIAIS (SADE) VOLTADOS A APOIO A DECISÃO NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Bacias hidrográficas e grupos delas interligadas são sistemas inerentemente complexos com muitos componentes interdependentes. Ferramentas analíticas eficientes e que apreendam a totalidade desta complexidade são necessárias para subsidiar uma política de alocação racional que leve a estratégias de uso da água sustentável (McKinney et al, 1999).

Modelagem adequada em nível de bacia para apoiar a decisão nas diversas opções de políticas de água é uma importante área de estudo na gestão de recursos hídricos. Para disponibilizar ao decisor uma modelagem, mesmo que de forma isolada, é requerido minimamente alguma forma de manipular os dados de entrada e saída, bem como alguns recursos de diálogo, em geral através de interfaces gráficas. Sistemas que disponibilizam mesmo que de forma mínima estes recursos são conhecidos como Sistemas de Apoio a Decisão (SAD's). Eles têm por objetivo apoiar atividades de tomada de decisão pouco ou completamente não-estruturadas através do uso de modelos e técnicas analíticas combinadas às funções tradicionais de acesso e recuperação de dados, tudo isto através de uma interface amigável. Enquanto as decisões

estruturadas são lógicas, os fatores e resultados são bem definidos, ou seja, são programáveis, as não-estruturadas envolvem abordagem de tentativa e erro, heurística, intuição e bom senso.

No contexto da gestão e planejamento dos recursos hídricos, esses Sistemas têm sido extensivamente usados em conjunto com Sistemas de Informação Geográficos (SIG's) e neste caso também são chamados de Sistemas de Apoio a Decisão Espaciais (SADE's). A principal vantagem deste tipo de ferramenta é a possibilidade de conexão dos modelos com bases de dados geográficas. No apoio ao gerenciamento dos recursos hídricos ambas, a representação espacial da unidade de gestão ou trecho dela, e a aplicação de modelos para resolução de problemas são requeridos. (Walsh, 1992 apud McKinney et al., 1997)

Em geral, os SAD's apresentam uma interface em que é possível fazer alterações facilmente, essa facilidade permite ao usuário realizar atualizações ao sistema existente. Essa é uma característica essencial ao sistema, pois garante a não defasagem das informações pelo usuário. Um SAD precisa possuir três características técnicas, um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGBD), um Sistema Gerenciador de Base de Modelos (SGBM) e uma interface amigável ao usuário que tenha os sistemas mencionados, que é o Sistema de Gestão e Geração de Diálogo (SGGD) (Sprague, 1989; Alcoforado de Moraes, 1997; Silva, 2017).

Entre os SAD's utilizados para apoiar a decisão na alocação de recursos hídricos podemos destacar as modelagens AQUATOOL, MIKE-BASIN e WEAP que são utilizados para simular e/ ou otimizar decisões de alocação de águas integradas à hidrologia e infraestrutura hídrica (Mounir et al., 2011). Esses modelos são representados por camadas interativas de simulação que exigem que o sistema seja representado por uma rede de nós e links (Loucks e Beek, 2017). A quantidade de nós para representar a rede depende dos objetivos do modelador e cada nó necessita de um conjunto de dados que vai depender do que será modelado. Os links representam a relação existente entre esses nós e deve representar da melhor forma possível a realidade. Se a motivação do modelo é entender a relação quantitativa da oferta e demanda por água, então não é necessário a adição dos dados da qualidade da água. Mas se as variáveis de qualidade são importantes na modelagem esses dados podem ser inseridos nos nós da rede. Quanto mais complexo o modelo, maior será a quantidade de dados que deve ser inserido e maior o tempo que deve ser alocado para construir o modelo de gestão. A Figura 14 mostra um exemplo da rede de nós e links na modelagem WEAP. A construção completa da interface da modelagem consiste na construção de toda a rede de nós e links e a colocação dos dados pertinentes em cada um desses nós.

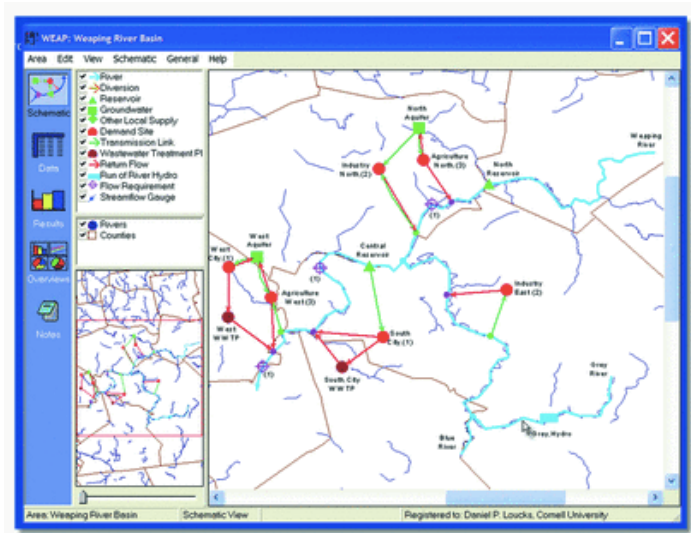


Figura 14: Interface da modelagem WEAP, que é utilizada para descrever a rede de nós e links que representa a hidrologia da região com a infraestrutura de gestão. Fonte: Loucks e Beek (2017).

A modelagem de “Avaliação e planejamento da água” (*Water Evaluation and Planning-WEAP*) é um software que emprega um algoritmo de otimização baseado em prioridades como uma alternativa à lógica baseada em regras hierárquicas que usa um conceito de “*Equity Group*” para alocar água quando a oferta é insuficiente (Mounir et al., 2011).

Os modelos e sistemas de apoio a decisão provêm resultados aos gestores para subsidiar o seu processo de decisão e não são tentativas de imposição a uma ou outra estratégia. Resultados de modelagens não devem ser entendidos como valores exatos, e sim devem mostrar tendências e indicações qualitativas ao gestor. Os esforços de modelagens e sistemas devem ser direcionados para prover informações e uma melhor compreensão dos impactos de uma nova alocação (Loucks e Beek, 2017).

Alcoforado de Moraes et al. (2013) apresentaram uma proposta de arquitetura de um Sistema de Apoio à Decisão Espacial para Gestão de Bacias Hidrográficas que tinha como finalidade o apoio a decisão no planejamento e gestão de bacias hidrográficas usando modelos de otimização baseados em uma rede de nós e links. Disponibilizava uma base de dados espacial que possibilitava a aplicação do modelo de otimização, além de uma interface amigável com capacidade de incorporar mudanças e modificar funções objetivo e restrições. A arquitetura previu funcionalidades capazes de construir redes de nós e links, gestão de dados econômicos e hidrológicos dos componentes da rede e construção de modelos de otimização usando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e o software GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Mais recentemente, baseando-se nessa arquitetura e com recursos do CNPq/ CT-Hidro

foram desenvolvidas por Silva (2017) as principais funcionalidades do HEAL (*Hydro-Economic Allocation*) System, utilizando-se a estrutura ArcGis JavaScript API e ArcGis for Server. A integração proposta nesta tese foi desenvolvida usando as funcionalidades existentes e algumas em desenvolvimento de tal sistema.

2.12 HEAL SYSTEM

O HEAL System é um Sistema de Apoio a Decisão Espacial (SADE) para apoio a decisão na definição de políticas de alocação de águas desenvolvido com recursos CNPq/ CT-HIDRO. Os principais módulos e funcionalidades do HEAL desenvolvidos no âmbito de tal projeto incluem: a aquisição/ conformação de dados geográficos; a geração/ modificação da rede de nós e links e da base de dados associada; e a geração de modelos. Funcionalidades ainda a desenvolver são a visualização de resultados na interface com o usuário e a gerência de código fonte.

A fundamentação teórica da arquitetura, proposta por Alcoforado de Moraes et al. (2013), baseou-se no artigo de Daene C. McKinney, Ximing Cai (2002) intitulado "*Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method*".

O sistema foi desenvolvido dentro da estrutura selecionada usando a ArcGIS¹⁹ JavaScript API e ArcGIS for Server (ESRI, 2015). O ArcGIS JavaScript API permite criar aplicativos de mapeamento e visualização de seus dados na web. O ArcGIS Server permite o compartilhamento de mapas e ferramentas de geoprocessamento entre os diferentes usuários e a utilização em qualquer computador com acesso à internet. Assim o HEAL System pode ser acessado em qualquer lugar do mundo e pode ser compartilhada por uma comunidade de usuários do sistema. Dentro do sistema pode ser adicionada uma base de dados que ajude a realizar o mapeamento das informações geográficas da região, essa base consiste em uma relação de estrutura de dados em tabelas. Como o sistema pode ser compartilhado entre os usuários, uma vez adicionado o dado no sistema os outros usuários que possuem acesso podem visualizar, adicionar ou atualizar a base existente. A vantagem dessa base de dados é evitar a

¹⁹ ArcGIS (*Architecture Geographic Information System*) é um sistema que foi construído para trabalhar com mapas e informações geográficas. No sistema podem ser utilizados mapas, adicionados banco de dados, a análise das informações mapeadas e construção de ferramentas que auxiliem o mapeamento das informações geográficas.

redundância dos dados adicionados entre os diferentes usuários e a formatação consistente dos dados. (Alcoforado de Moraes et al., Relatório Técnico em preparação 2019)

Usando o HEAL System foi criada a rede de nós e link da nossa área de estudo, descrevendo de forma espacial, os chamados nós fonte - os rios, afluentes, lagos, reservatórios, etc.- e os nós de demanda representando todos os usuários outorgados de água e os links entre eles, da nascente até a foz das quatro bacias. Os dados geográficos e econômicos desses dois tipos de nós são integrados, armazenados e gerenciados pelo SADE, que então gera o modelo de otimização baseado na rede de nós e links. Os links utilizados no sistema servem para detalhar de forma espacial como os nós estão conectados e são de dois tipos: links de passagem que descrevem a ligação entre um nó de oferta a jusante e outro nó de oferta a montante, e os links de uso que descrevem a ligação entre um nó de oferta e um nó de demanda, isto é, uma retirada de água.

Para obter os dados geográficos da rede são utilizadas camadas que podem ser adicionados ao HEAL System a partir das fontes de dados do Sistema Nacional de Informações dos Recursos Hídricos (SNIRH), que são compatíveis com o Sistema conforme já mencionado acima. As camadas são mapas geográficos da região, tais como: delimitação de rios e afluentes, bacias, reservatórios, lagos, regiões urbana e rural, estações fluviométricas e pluviométricas, pontos de retirada e retorno de água.

A cada nó da rede podem ser agregados, além dos dados espaciais, dados hidrológicos e econômicos, que serão incorporados e mantidos em uma base de dados espacial, a partir do qual se gerarão os modelos de otimização da rede.

A rede de nós e links deve ser construída de forma que melhor represente a realidade, mas sem perder de vista que uma maior quantidade de nós de oferta e demanda implicará uma maior quantidade de dados requerida pelo sistema e uma maior complexidade do modelo de otimização.

3. ESTUDO DE CASO, MATERIAIS E METODOLOGIA

A partir de um modelo de otimização desenvolvido sobre a rede de nós e links da área de estudo, poderá ser identificado o valor ótimo da alocação de água entre os diferentes usuários que demandam o recurso hídrico, seguindo diversos critérios. Na otimização aqui proposta, será maximizado o atendimento aos demandantes da água bruta superficial, isto é, da água ofertada

no ano de 2012 nos rios principais, afluentes e reservatórios. Esta otimização simulará a gestão que é feita usualmente pelas agências reguladoras através da cessão e controle de outorgas, havendo reduções lineares em situações de escassez. Para mensurar os efeitos econômicos dessas reduções, ou seja, do uso dos atuais instrumentos de gestão, será utilizada uma integração do modelo de otimização com uma matriz de Insumo-Produto inter-regional. Dessa forma, poderão ser calculados não só os efeitos econômicos diretos de diferentes alocações dos recursos hídricos aos usuários da área de estudo e seus respectivos setores, mas também os impactos indiretos dadas as relações intersetoriais e inter-regionais na economia, o que resulta no impacto econômico total da estratégia atual de alocação no período estudado. A matriz de Insumo-Produto (MIP) é um retrato da economia em um determinado ano, que mostra a relação entre os setores da economia em termos de insumos utilizados e produtos. Quando elaborada de forma inter-regional, permite o estudo detalhado do sistema econômico dividido em duas ou mais regiões e seus fluxos de bens e serviços (Brene et al., 2011).

A integração proposta nesta tese entre essas duas diferentes modelagens econômicas, uma baseada em uma rede física e outra agregada, deve possibilitar a conexão das variações de água bruta resultantes de uma nova estratégia de alocação de água por setor econômico e região, dadas pelo modelo de otimização às variações na produção desses mesmos setores/regiões. Ademais, através das relações intersetoriais e inter-regionais da economia, os efeitos nos demais setores associados a eles indiretamente e na demanda final.

3.1 ESTUDO DE CASO

A área de estudo desta tese consiste em quatro bacias interligadas do estado de Pernambuco, a saber: bacia de Capibaribe, bacia do Ipojuca, bacia do Sirinhaém e bacia do Una. Essas bacias são mostradas na Figura 15.

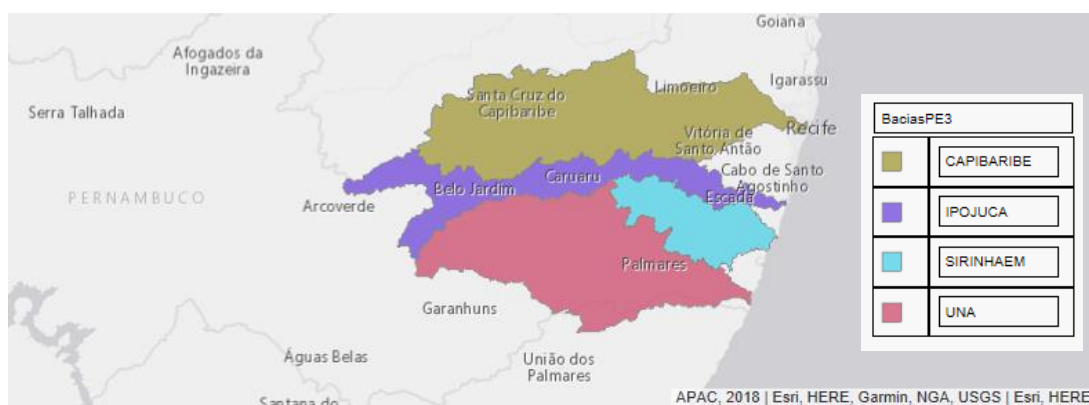


Figura 15: As quatro bacias do estudo de caso. Fonte: HEAL System.

Essas bacias possuem sistemas de abastecimento de água²⁰ que são intermunicipais, sendo que alguns deles chegam a levar a água captada em um município de uma bacia para o consumidor final de um município em outra bacia, um exemplo é o sistema Prata-Camevô-Agrestina onde a captação ocorre na barragem do Prata que está localizado na bacia do Una. Entre os municípios abastecidos estão Caruaru (localizado na bacia do Ipojuca) e Agrestina (localizado na bacia do Una), portanto, existindo interligação entre as bacias em alguns desses sistemas.

A demanda por água é modelada baseando-se nas outorgas da região em que cada outorga que é emitida concede o direito de extração mensal da água por um determinado período. O conjunto de outorgas analisado nessa tese são as outorgas que foram emitidas pela Agência Nacional de Águas - ANA e as outorgas que foram emitidas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC.

As informações contidas nas outorgas emitidas pela APAC ou ANA são: o tipo da fonte (superficial ou de poço), localização da captação (a latitude e a longitude), município, data inicial da outorga, data final da outorga (validade), a vazão (m³/hora) em cada mês (jan. a dez), número de horas por dia das captações mensais (jan. a dez), a quantidade de dias em que se capta (jan. a dez), finalidade do uso, cultura e área irrigada no caso em que a finalidade de uso seja a irrigação. A finalidade de uso descrita nas outorgas emitidas na região das quatro bacias interligadas (que são: Abastecimento Público, Aproveitamento Hidroelétrico, Aquicultura em Tanque Escavado, Criação Animal, Indústria, Irrigação, Mineração-Extração de Areia/Cascalho em Leito de Rio, Serviços e Outras) possuem um nível de agregação dos setores econômicos diferente do que é visto usualmente na modelagem de Insumo-Produto (que geralmente utiliza a Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE) e,, consequentemente, inadequada para a proposta dessa tese.

Para o uso agrícola utilizaram-se as áreas irrigadas cadastradas pela APAC/ ANA nos termos de outorga e os coeficientes técnicos dados por cultura/ município estimados pelo o Ministério do Meio Ambiente (SRHU e FUNARBE, 2011). Assim foram multiplicados os coeficientes técnicos pelo número de segundos por mês e a quantidade de área irrigada dadas no termo de outorga junto com os meses utilizados, também disponibilizados pela APAC na outorga. Dado que os valores solicitados e outorgados não são necessariamente os efetivamente utilizados, procurou-se através do uso dos coeficientes técnicos, que estimam a real necessidade dos

²⁰ Falamos sobre os sistemas de abastecimento de água na seção 2.10.

cultivos, aproximar os valores outorgados dos efetivamente retirados em metros cúbicos por mês do ano estudado.

Para o propósito dessa tese foi necessário classificar as outorgas nos setores econômicos. Com o CPF/CNPJ do requerente da outorga foi feito um trabalho de classificação com o CNAE 2.0 realizado pelo Professor Doutor Ignácio Tavares de Araújo Junior da UFPB. Verificamos ainda que a indústria Sucroalcooleira estava classificada com somente um CNAE mesmo quando ocorre todo o processo da irrigação da cana de açúcar e o processo industrial, assim nessas outorgas fizemos a separação da água alocada para a irrigação e a água alocada para o processo industrial. Falaremos com mais detalhes na seção 3.2.

Sendo assim, a construção da base de dados dessa tese e a classificação por tipo de uso utilizaram as informações da APAC, ANA, COMPESA, FUNARBE, SIDRA-IBGE e CNAE 2.0. O detalhamento dessa construção será descrito na seção 3.2.

A Figura 16 mostra os totais dos valores absolutos e percentuais dos principais usos de água bruta superficial identificados nas quatro bacias. O principal tipo de uso é a agricultura, seguido pelo setor de água e esgoto.

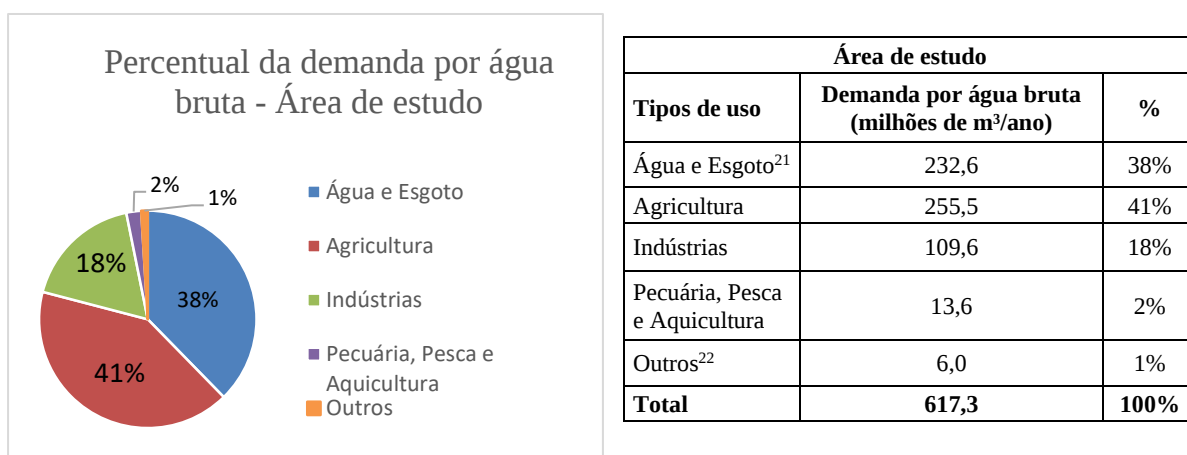


Figura 16: Demanda por água bruta pelos diferentes usos em toda a área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.

²¹ É o setor do abastecimento público e consequentemente inclui os usuários da água tratada.

²² É composta pelas seguintes atividades econômicas: eletricidade, construção, comércio, alimentação, atividades administrativas e administração pública.

A Tabela 3 mostra os valores absolutos e percentuais de demandas de água das principais culturas existentes na área de estudo. Observa-se que a cana de açúcar é a principal cultura demandante de irrigação. Outras culturas que utilizam água bruta na região são: banana, cará, tomate, milho, inhame, graviola, maracujá, goiaba e tangerina.

Tabela 3: Demanda por água bruta em milhões de m³ para todas as culturas na região da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da APAC, ANA e FUNARBE.

Área de estudo		
Cultura	Demanda por água bruta (milhões de m ³ /ano)	%
Cana-de-açúcar	249,7	97,7%
Banana	2,7	1,1%
Cará	1,0	0,4%
Milho	0,7	0,3%
Tomate	0,6	0,2%
Inhame	0,4	0,1%
Graviola	0,3	0,1%
Maracujá	0,1	0,04%
Tangerina	0,1	0,02%
Goiaba	0,03	0,01%
Total	255,5	100%

3.1.1 Bacia do Capibaribe

A bacia do Capibaribe possui aproximadamente 7502 km² de área e o rio principal tem 240 km de comprimento da nascente à foz. A área da bacia compreende 42 municípios do estado, ao menos parcialmente.



Figura 17: Em verde a área da bacia do Capibaribe. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe (2010).

A precipitação na bacia varia do mínimo de 600mm a 2400 mm ao ano (Plano Hidro ambiental da bacia do Capibaribe, 2010) onde as menores taxas de precipitação encontram-se na nascente do rio, aumentando gradativamente até a sua foz no litoral do estado. A Figura 18 mostra essa variabilidade de precipitação em toda a bacia.

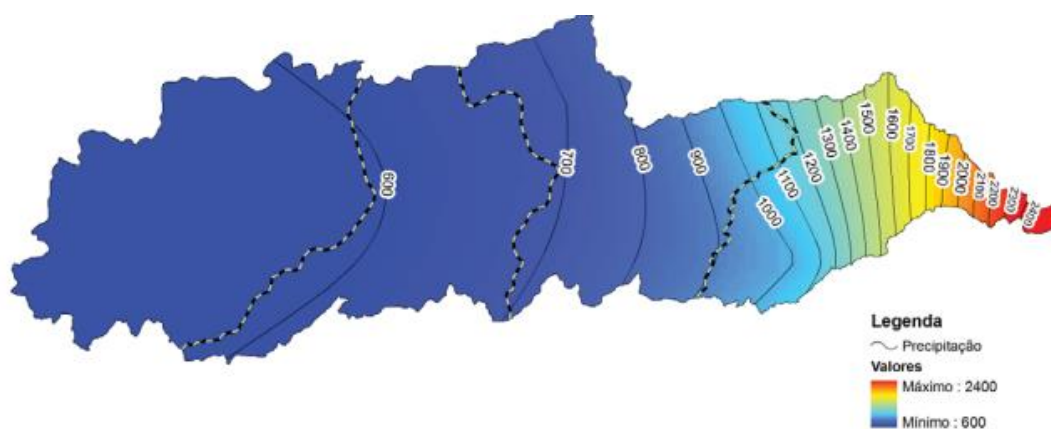


Figura 18: Precipitação ao ano em toda a bacia do Capibaribe. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe, 2010.

A demanda por água bruta na bacia do Capibaribe representa 41% do total demandado na área de estudo. A Figura 19 mostra os valores absolutos e percentuais dos principais usos na bacia.

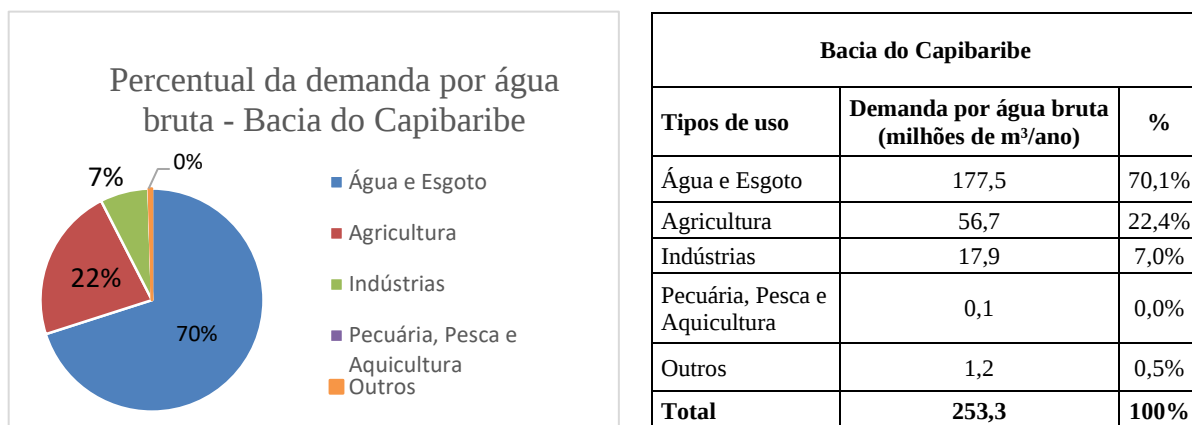


Figura 19: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Capibaribe. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.

Segundo dados da COMPESA²³, na bacia do Capibaribe foram captados no ano de 2012, 177,5 milhões de m³ para o abastecimento público²⁴. Esse valor representa 70,1% da demanda total por água bruta superficial na bacia. Desse total 30,8 milhões de m³ por ano foram captados na barragem do Jucazinho e 93 milhões de m³ no reservatório Tapacurá. A barragem do Jucazinho abastece cinco sistemas de abastecimento público integrados²⁵ diferentes, operados pela COMPESA. São eles: Sistema integrado Bezerros - Gravatá, integrado Prata – Camevô - Caruaru, integrado Jucazinho, integrado Tabocas - Santa Cruz do Capibaribe, integrado Tabocas – Toritama, abastecendo no total quinze municípios, a saber: Bezerros, Caruaru, Casinhas, Cumaru, Frei Miguelinho, Gravatá, Passira, Riacho das Almas, Salgadinho, Santa Cruz do Capibaribe, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Toritama, Vertente do Lério e

²³ Dados fornecidos através de pedido a Ouvidoria Geral do Estado de Pernambuco (OGE) no site www.ouvidoria.pe.gov.br e número de protocolo 201941343. A ouvidoria do estado encaminhou o pedido a ouvidora da COMPESA que respondeu no prazo estipulado.

²⁴ O ano de 2012 foi responsável pela maior retirada de água do setor de água e esgoto entre os anos de 2012 a 2015.

²⁵ São sistemas que fazem o abastecimento público de mais de um município através do uso de adutoras.

Vertentes. Esses municípios somados possuíam 211,4 mil números de economias²⁶ em 2012²⁷. A barragem do Tapacurá abastece o sistema integrado Tapacurá/Várzea do Una, que abastece quatro municípios: Camaragibe, Jaboatão dos Guararapes, Recife e São Lourenço da Mata, esses municípios somados possuíam 581,1 mil números de economias em 2012.

Segundo dados da APAC, ANA e FUNARBE, a principal cultura da bacia é a cana de açúcar²⁸ com uma demanda total de 56,5 milhões de m³/ano. As outras culturas existentes na bacia são: tomate, graviola, goiaba e cará que somados demandam 0,2 milhão de m³/ano na bacia.

Segundo dados da APAC e ANA, a demanda por água bruta da indústria é de 17,8 milhões de m³/ano em oito municípios diferentes e nas atividades: fabricação de produtos têxteis; confecção de artigos do vestuário e acessórios; e fabricação e refino de açúcar.

3.1.2 Bacia do Ipojuca.

A bacia do Ipojuca possui aproximadamente 3508 km² de área e o rio principal tem 320 km de comprimento da nascente à foz. Passando ao menos parcialmente por 25 municípios do estado. O maior usuário de água bruta na bacia é a agricultura, que é seguido pela indústria e o setor de

²⁶ A Agência de Regulação de Pernambuco – ARPE, define no artigo 78 da resolução nº 85 de Outubro de 2013 uma economia conforme os seguintes critérios: I - cada imóvel com instalação individual, com ou sem numeração própria; II - cada apartamento em prédio residencial; III - as áreas de uso comum de prédios ou conjunto de edificações; IV - cada 2 (dois) apartamentos ou fração em imóvel comercial destinado a hotel ou apart-hotel (flat); - cada 3 (três) apartamentos ou fração em imóvel comercial destinado a motel, pousada, pensionato ou similar, com instalações em comum; VI - cada comércio anexo à residência com acesso interno e instalações comuns, prevalecendo a categoria comercial quando ambos dispuserem de pontos de utilização; VII - cada 2 (duas) lojas ou fração, em shopping, galeria ou similar, com instalações comuns; VIII - cada grupo de 4 (quatro) ou fração de: sala, escritório, box ou similar, em imóvel comercial com instalações comuns; IX - cada box de lava-jato em posto de serviço automotivo ou garagem comercial, com instalações comuns; X - cada 2 (dois) apartamentos ou fração em hospital público ou privado; cada grupo de 3 (três) apartamentos/consultórios ou fração, em clínicas de qualquer natureza, com instalações comuns; XII - para cada enfermaria, refeitório, lanchonete, UTI, lavanderia, emergência, centro cirúrgico, unidade de hemodiálise, dependência médica e laboratório, localizados em clínicas e hospitais públicos ou privados, com instalações comuns; e, XIII - cada grupo de 2 (dois) vasos sanitários ou fração de 2 (dois), instalados em pavimentos livres, sem caracterização de salas, nos parques de diversões, circos, feiras livres, exposições ou similares.

²⁷ Fonte: COMPESA.

²⁸ Algumas outorgas classificadas pelo CNAE 2.0 como industriais fazem também a irrigação da cana de açúcar, nesses casos separamos na outorga a água alocada para o processo industrial da água utilizada para irrigação da cana de açúcar, vemos essa separação em mais detalhes na seção 3.2.

água e esgoto. A Figura 20 mostra os valores absolutos e percentuais dos principais usos do recurso hídrico na bacia.

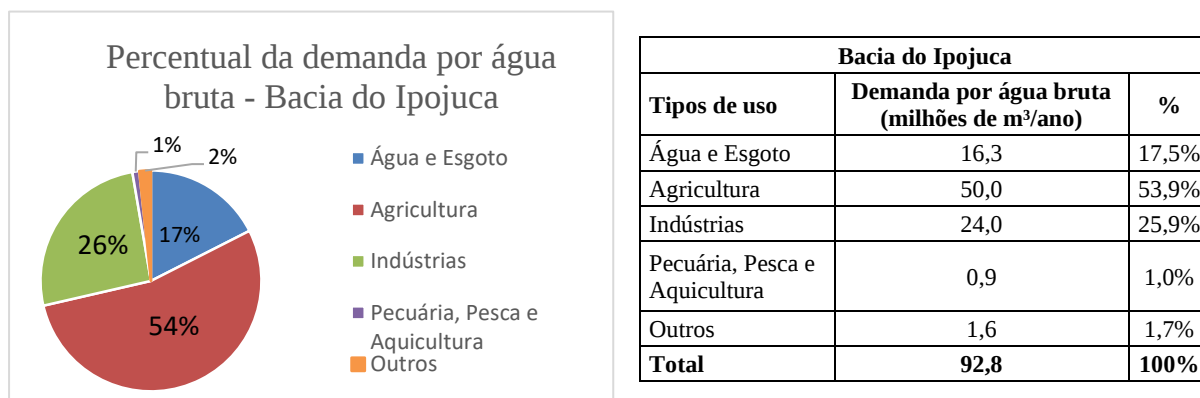


Figura 20: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Ipojuca. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.

Segundo dados da COMPESA, o setor de água e esgoto²⁹ demanda 16,3 milhões de m³/ano, o que corresponde a 17,5% da demanda total por água bruta superficial na bacia do Ipojuca.

Segundo dados da APAC e ANA, as outorgas da indústria estão em seis municípios diferentes. A atividade com maior demanda por água bruta é a fabricação de produtos alimentícios com 22,8 milhões de m³/ano demandado, o que representa 95% do total demandado pela indústria na bacia.

O tipo de uso com maior demanda estimada por água bruta superficial na bacia do Ipojuca é a agricultura. Segundo dados da APAC, ANA e FUNARBE e elaboração própria do autor, 49,5 milhões de m³/ano são para a irrigação da cana de açúcar. Outras culturas existentes na bacia são banana, cajá, cará, chuchu, graviola, hortaliças, maracujá, milho e tangerina. Essas culturas correspondem a um total de 30 outorgas e demandam um total 0,5 milhão de m³/ano.

²⁹ Para esse setor foram utilizadas as informações da COMPESA complementando os dados da APAC/ANA por dois motivos: (i) as outorgas ANA/APAC não estavam atualizadas; (ii) os dados da COMPESA registram o q foi efetivamente utilizado naquele ano, e não o que foi solicitado e outorgado. Mais detalhes podem ser vistos na seção 3.2.

3.1.3 Bacia do Sirinhaém.

A bacia do Sirinhaém possui aproximadamente 2070 km² de área e o rio principal tem 158 km de comprimento da nascente à foz. Passando ao menos parcialmente por 19 municípios do estado. Os valores absolutos e percentuais dos diferentes tipos de usos na bacia podem ser vistos na Figura 21.

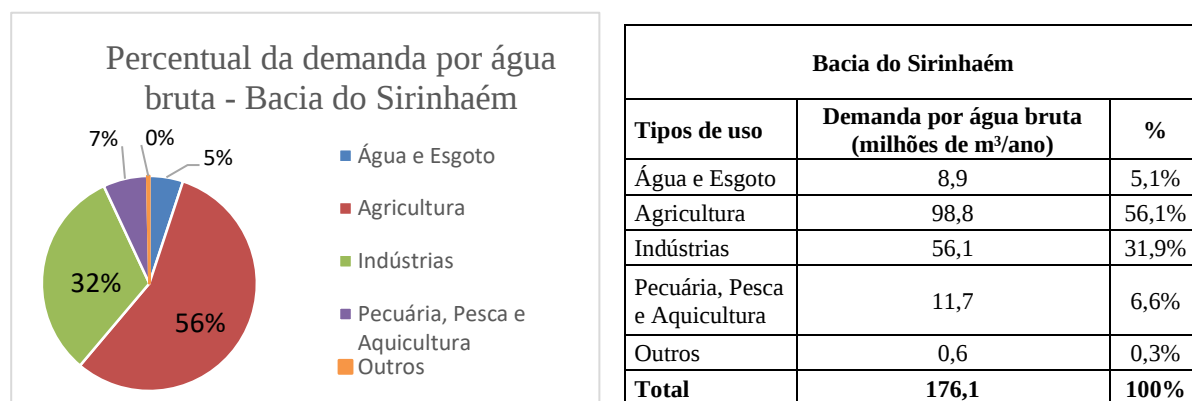


Figura 21: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Sirinhaém. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.

Segundo dados da APAC, ANA e IBGE, a atividade fabricação de produtos alimentícios é a atividade que demanda a maior quantidade de água bruta para o tipo industrial, com um total de 34,7 milhões de m³/ano. Outras atividades industriais que demandam água bruta na bacia são: fabricação de álcool, fabricação de bebidas alcoólicas e fabricação de produtos cerâmicos.

Segundo dados da APAC, ANA, FUNARBE e IBGE, a agricultura é o principal usuário de água bruta superficial na bacia, sendo a cana de açúcar o principal demandante com 96,3 milhões, o que representa 97,3% de toda a água bruta demandada pela agricultura na bacia. Outras culturas que demandam água bruta na bacia são: banana, cará, flores, goiaba, graviola, hortaliças, inhame, mamão, milho e tomate. Com um total de 156 outorgas e demanda somada de 2,5 milhões de m³ por ano.

3.1.4 Bacia do Una.

A bacia do Una possui aproximadamente 5872 km² de área e o rio principal tem 255 km de comprimento da nascente à foz. Passando ao menos parcialmente por 42 municípios do estado. Os valores absolutos e percentuais dos diferentes tipos de usos na bacia podem ser vistos na Figura 22.

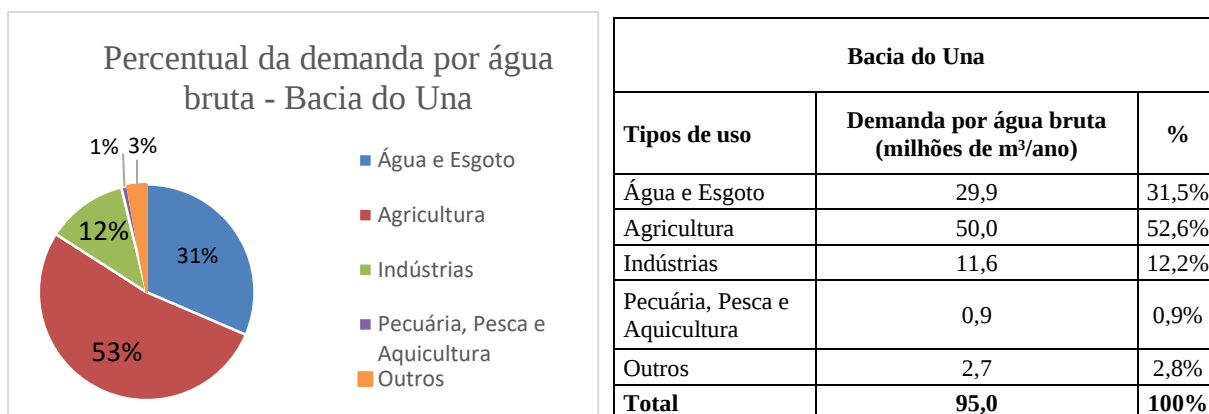


Figura 22: Demanda por água bruta pelos diferentes usos na bacia do Una. Fonte: Elaborado pelo autor baseado nas informações da COMPESA, APAC, ANA, FUNARBE e IBGE.

Segundo dados da COMPESA, complementando os dados da ANA/APAC para o ano de 2012, conforme já explicado, o setor de água e esgoto capta nesta bacia 29,9 milhões de m³ por ano. Desse total 18,1 milhões de m³ por ano é captado na barragem do Prata (também chamado de barragem do Alemão), isto é, 60,5% de toda a demanda por água bruta superficial é para utilização do abastecimento público na bacia. A barragem do Prata abastece os sistemas³⁰ integrado Prata-Camevô-Agrestina e Prata-Camevô-Caruaru, esses dois sistemas³¹ abastecem os municípios Agrestina e Caruaru que somados possuem 104,7 mil números de economias em 2012. O restante da captação para o setor de água e esgoto está dividido em vários pontos de captação incluindo a barragem Poço de Areia (ou barragem do Bita) e barragem Pau-Ferro.

O uso industrial demanda 11,6 milhões de m³/ano na bacia, nas atividades extração de pedra, areia e argila, fabricação de açúcar em bruto e fabricação de álcool.

Segundo os dados da ANA, APAC e FUNARBE, a agricultura é o principal tipo de uso da água bruta na bacia do Una. A cana de açúcar demanda 47,5 milhões de m³/ano o que corresponde a 95% de toda a água bruta demandada pela agricultura na bacia. Outras culturas da região são banana, batata doce, cará, graviola, hortaliças, inhame, maracujá, milho, pimentão e tomate.

Todas essas outorgas identificadas como usos das quatro bacias estudadas, foram usadas para gerar a rede de nós e links, a partir do qual será obtido o modelo de otimização. Os nós da rede

³⁰ Fonte: Agência Nacional de Águas-ANA.

³¹ Fonte: Agência Nacional de Águas-ANA.

podem ser de oferta e demanda, e o tratamento dos dados acima para obtenção das informações relativas a esses nós é descrito na próxima seção.

3.2 TRATAMENTO E CONSOLIDAÇÃO DAS OFERTAS E DEMANDAS DE ÁGUA DA ÁREA DE ESTUDO E ALIMENTAÇÃO DA BASE DE DADOS NA PLATAFORMA *HEAL*

3.2.1 A REDE DE NÓS E LINKS DA ÁREA DE ESTUDO

A rede de nós e links é a estrutura principal do modelo de otimização da alocação de água, já que ela é a integradora das informações hidrológicas e econômicas dos usuários demandantes do recurso. Esta representação através de uma rede de nós e links consta em Rosegrant et al. (2000), e os modelos econômicos desenvolvidos sobre tal representação foram mais recentemente chamados modelos baseados em rede (Bekchanov et al., 2017).

A representação das quatro bacias interligadas, que se constituem na nossa área de estudo, será feita através de tal rede de nós e links representando o fluxo d'água entre os nós, que podem ser fonte (rios, afluentes, reservatórios) ou demanda (usuários consuntivos e não-consuntivos), tudo de forma discreta. Assim, os rios serão segmentados e em cada nó fonte será calculado o balanço hídrico que levará em conta a oferta hidrológica e as demandas existentes.

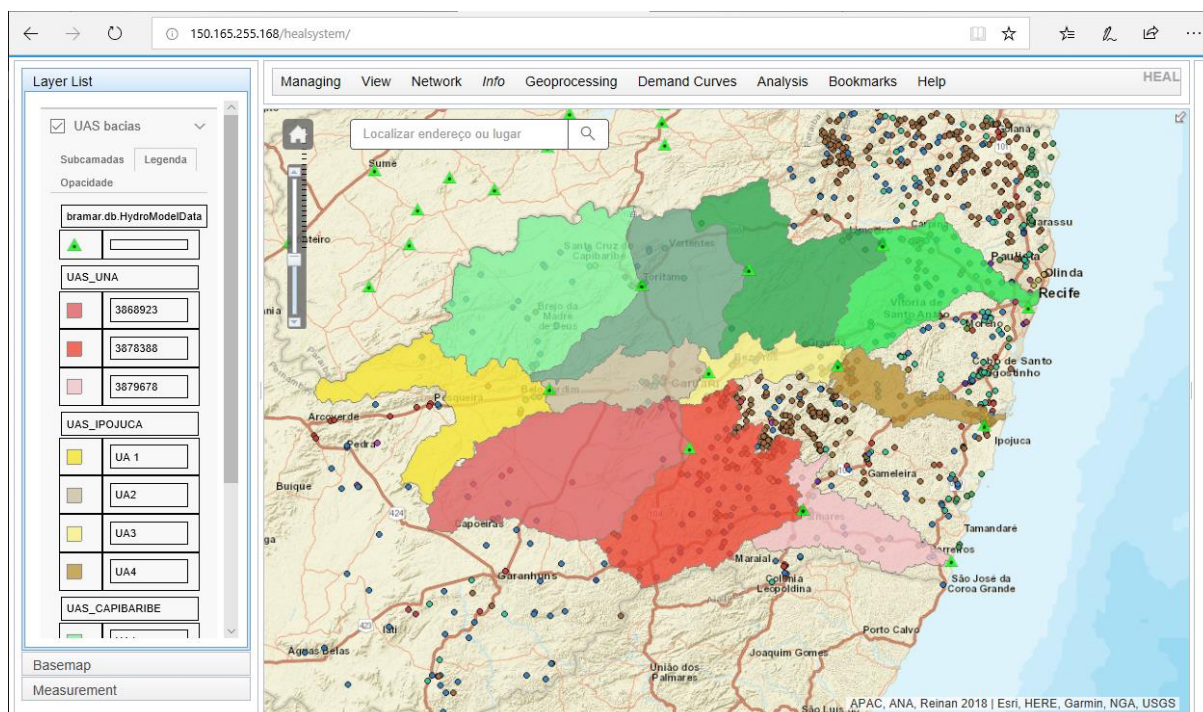
Os nós de demanda representarão os usuários consuntivos considerados na mesma rede, que terão sua alocação decidida em passos mensais no horizonte de tempo no ano de 2012.

3.2.2 Dados de oferta (Retirado do Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPEs da seção elaborada por Gerald Silva e Alfredo Ribeiro Neto).

A modelagem da disponibilidade hídrica superficial das bacias hidrográficas na área de estudo utilizou o modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão MODHAC. O modelo MODHAC (Schwarzbach e Lanna, 1989) é do tipo concentrado, conceitual e determinístico.

O modelo utilizou dados de precipitação da APAC consistidos e preenchidos para área de estudo e foi calibrado utilizando dados fluviométricos disponíveis no sistema Hidroweb da ANA. Os dados de oferta (séries de vazão) foram gerados para as unidades de análise (UA's) do Capibaribe e Ipojuca correspondente ao período 1998 a 2018. Para a bacia hidrográfica UNA o período de simulação foi 1963 até 2013.

A Figura 23 mostra as unidades de análise (sub-bacias hidrográficas) das três bacias com ponto (exutório da bacia) onde são gerados os dados pseudo-históricos de vazão.



*Figura 23: Unidades de análise (UA) das bacias hidrográficas Capibaribe, Ipojuca e Una.
Fonte: Heal System.*

Os dados de oferta descritos acima foram obtidos através de modelagem hidrológica para cada uma das UA's por bacia e então associados aos nós de oferta identificados na rede de nós e links. A regionalização hidrológica é especialmente útil em regiões com escassez de dados fluviométricos. A regionalização usa uma referência para um ponto mais próximo (ou mais apropriado) com as séries temporais de escoamento superficial relacionadas a uma área de drenagem. Essas informações são processadas utilizando a área da bacia hidrográfica do nó de oferta analisado e a fração da área da bacia hidrográfica 'doadora', que permite o cálculo de novas séries temporais de escoamento para este nó de oferta. O sistema HEAL gera estes dados de oferta automática na criação do código GAMS para cada nó de oferta.

NÓS DE OFERTA: (Extraído do Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES):

Há três tipos de nós de oferta na rede de nós e links a quem vão ser associados os dados de oferta descritos no item acima quando incorporados ao HEAL System: o *inflow node*, o *stream node* e o *reservoir node*. Dependendo do tipo, esses nós terão atributos diferentes. O *inflow node* representa a foz de um rio principal ou de um afluente, enquanto o *stream node* representa pontos intermediários ao longo das calhas dos rios, segmentando-os, e o *reservoir node*

representa os reservatórios da área de estudo. Esses nós de oferta dividem os rios principais estudados - rio Ipojuca, rio Capibaribe, rio Sirinhaém e rio Una - em vários trechos. Ademais, é a partir destes nós de oferta que ficarão ligados os nós de demanda, representativos dos diversos usuários da água dos rios principais e seus afluentes da área de estudo.

Os nós de oferta são identificados de uma forma interativa, sendo a característica espacial do Sistema HEAL desenvolvido sobre uma plataforma de Sistema de Informações Geográfico (SIG) importante para instrumentalizar esse processo. Assim, a identificação dos nós de oferta da rede foi feita a partir das informações espaciais de diversas camadas (*layers*) da área de estudo, tais como: delimitação das bacias hidrográficas; rede hidrológica dos principais rios e afluentes e localização das outorgas e respectivos usuários, segundo Cadastro Nacional de Recursos Hídricos (CNDARH), mantido pela ANA.

Uma vez identificados geograficamente os nós de oferta, é necessário então atribuir a esses nós os dados de disponibilidade hídrica. Conforme já mencionado acima, na seção referente aos dados de oferta, a atribuição da vazão incremental ao nó de oferta em relação ao último nó à montante, é feita a partir da chamada regionalização hidrológica. Para isso, é necessário o conhecimento da área da bacia incremental associada ao nó, bem como do ponto de referência a partir do qual a série hidrológica gerada será regionalizada.

Dessa forma, essas duas informações – área incremental e UA de referência - precisarão ser colocadas como atributo de cada nó de oferta. Para a obtenção da área da bacia incremental utiliza-se a ferramenta de geoprocessamento desenvolvida e disponibilizada pelo Heal System, que informa a partir de dois pontos a montante e a jusante a área incremental. A *Figura 24* mostra a área (sombreada em azul) representativa da bacia incremental que será atribuída ao nó de oferta associada a chegada do afluente ao rio principal. A ferramenta calcula e apresenta a área incremental como sendo de 20,07 km². Este valor é então um dado de entrada do HEAL, ou seja, um atributo do referido nó de oferta.

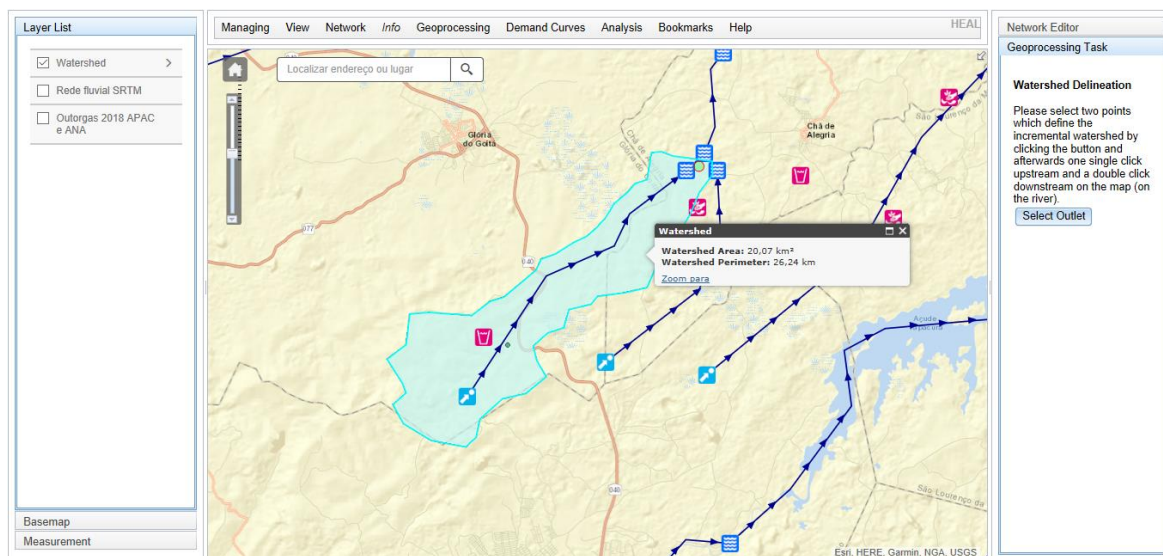


Figura 24: Ferramenta de geoprocessamento disponibilizada pelo HEAL para delimitação de área incremental entre dois nós de oferta da rede de nós e links. Fonte: Heal System.

Além da área da bacia incremental, aos nós *stream* e *inflow* são atribuídos também um número de identificação (*Stream ID*), e a unidade UA (*Ref. Gauge ID*) que deve ser a mais próxima do nó de oferta. Desta UA é que serão usados os dados gerados pelo modelo hidrológico, a ser regionalizados para o nó de oferta em questão, usando-se a bacia incremental já obtida conforme explicado acima. A Figura 25 apresenta a tela com os atributos a ser preenchidos para os nós de oferta *stream* e *inflow*.

Stream Nodes	
Stream ID:	30812
Project ID:	1.605
Stream Name:	
Min Flow:	
Max Flow:	
Ref. Gauge ID:	3.859.736
Regionalization Factor:	
Watershed Area km²:	143,42
Doner Watershed Area km²:	

Excluir

Figura 25: Atributos do nó de oferta da rede de nós e links. Fonte: Heal System.

No caso dos nós reservatórios, são atribuídos além dos atributos requeridos aos demais nós fonte da rede - número de identificação (*Reservoir ID*), a unidade UA (*Ref. Gauge ID*) e a área incremental (*Watershed Area*) - o volume máximo (*Maximum Storage*), o volume inicial e mínimo. Esses valores foram disponibilizados pela APAC³² que fazem acompanhamento periódico do nível dos reservatórios.

3.2.3 Dados de Demanda

Os valores demandados pelos usuários outorgados em cada bacia incremental ou trecho da rede - entre um nó de oferta e outro à montante – foram obtidos fazendo-se uma superposição entre as áreas incrementais, que definem a contribuição aos trechos da rede e as camadas geográficas (*layers*) com as outorgas da ANA/ APAC, relacionadas no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos - CNARH.

As outorgas de direitos de uso da água têm o objetivo de fazer o controle dos usos da água, sendo um dos mais utilizados instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A lei nº 9.433/1997, que instituiu a PNRH, estabeleceu a Agência Nacional

³² Valores histórico disponibilizados pela APAC dos níveis dos reservatórios de Pernambuco podem ser encontrados em http://200.238.109.99:8080/apacv5/cons_monitora_web/cons_monitora_web.php.

de Águas (ANA) como a instituição responsável pela emissão de outorgas de direito de uso para os usuários em que o corpo hídrico é a União, isto é, os lagos, reservatórios, rios e afluentes que passam em mais de um estado ou que sirvam de limite entre estados ou países. Quando o corpo hídrico tem domínio estadual, a instituição responsável pela emissão de outorgas de direito de uso são órgãos estaduais. Atualmente, no caso de Pernambuco, a instituição responsável pela cessão de direitos de uso é a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

As informações relativas a essas outorgas é que se constituíram na base a partir da qual se identificaram os nós de demanda da rede e associaram-se a estes os seus atributos (das outorgas). Assim, haverá dois tipos de outorgas a se considerar na nossa área de estudo, a saber: as outorgas federais obtidas através do site da ANA e as outorgas estaduais obtidas através da APAC. Essas duas bases tiveram que ser consolidadas, algumas vezes corrigidas e complementadas para termos então o conjunto base com as outorgas da área de estudo, que efetivamente irão ser representadas nos nós de demanda da rede.

Consolidação e tratamento das outorgas levantadas na área de estudo:

As outorgas consideradas foram as que cedem direitos de uso à água bruta superficial, ou seja, às retiradas em corpos hídricos superficiais. Assim as outorgas que retiram águas subterrâneas foram excluídas da análise. Apesar de quantitativamente em número de outorgas as retiradas de poço sejam em maior número, a quantidade somada dessas retiradas é uma fração pequena quando comparada às outorgas em que a retirada é em águas superficiais.

Com relação ao período considerado, foram usadas todas as outorgas, mesmo as que tinham processos com datas posteriores ao período estudado (o ano de 2012) e outras com atos vencidos. A explicação para isso é que, segundo informações das agências de águas, responsáveis pela cessão de outorgas, muitas vezes os usuários iniciam o uso antes mesmo de terem seu processo aprovado e continuam utilizando mesmo sem renovação. Como não tínhamos forma de assegurar quais as outorgas estavam realmente em uso e precisávamos de uma estimativa das demandas a ser usada para o ano de 2012, decidimos por incluir todas.

Para o uso agrícola, não foram utilizados os valores mensais requeridos nos documentos de outorga no ano de 2012, ou seja, os valores que constavam nas bases de dados da APAC/ANA. Ao invés disso, utilizaram-se as áreas irrigadas cadastradas pela APAC/ANA nos termos de outorga e os coeficientes técnicos dados por cultura/município estimados pelo Ministério do Meio Ambiente (SRHU e FUNARBE, 2011). Assim, foram multiplicados os coeficientes

técnicos pelo número de segundos por mês e a quantidade de área irrigada dadas no termo de outorga junto com os meses utilizados também disponibilizados pela APAC na outorga. Dessa maneira, procurou-se estimar o uso efetivo na agricultura, dado que os coeficientes técnicos mensuram a real necessidade da planta, enquanto a outorga procura assegurar um direito de uso, em geral sendo requerido de uma forma sobre estimada.

Algumas outorgas não vinham com a informação da área irrigada, para essas outorgas foi utilizado o método de interpolação linear³³ para estimação da área utilizando o tipo de cultura, a base de dados completa de outorgas de Pernambuco e a demanda anual outorgada. Depois disso, com a área irrigada estimada, utilizaram-se os coeficientes técnicos conforme descrito acima.

No caso das outorgas de Abastecimento Público (setor de água e esgoto), importante tipo de uso no Agreste, evidenciou-se ausência e desatualização das informações nas bases da APAC/ANA (outorgas vencidas, desatualizadas e algumas sem indicativo dos mananciais de onde se originam) e por isso decidiu-se utilizar os valores registrados pela equipe de produção da COMPESA³⁴, que é responsável pela captação de água bruta e produção de água tratada no Estado. Assim, deve-se ressaltar que também no caso do Abastecimento Público não se consideraram os valores mensais das bases de outorgas federal e estadual, pois muitas vezes o requerimento é feito para vários anos e o quantitativo pedido baseado em uma expectativa de uso futuro. Assim, os dados de outorgas de Abastecimento Público utilizados foram os dados de captação da COMPESA, informado pelo Setor da Produção da mesma companhia em todos

³³ A interpolação é um método matemático simples que permite construir a partir de um conjunto pontual de informação a estimação de novos dados. A interpolação linear entre dois pontos (x_0, y_0) e (x_1, y_1) e um ponto intermediário (x, y) é dado por:

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

Assim utilizando no eixo x a demanda anual por água bruta superficial e no eixo y a área irrigada, se em uma outorga não temos informação da área irrigada, escolhemos o conjunto de informações com a mesma cultura e os pontos mais próximos de demanda anual x_0 e x_1 e área irrigada y_0 e y_1 e usando interpolação calculamos para a partir da demanda anual da outorga estudada x a área irrigada y . Com essas informações completamos os dados de área irrigada para todas as outorgas da região.

³⁴ Esse trabalho foi realizado com auxílio do gerente Sérgio Murilo Guimarães da COMPESA e da professora mestre Laíse Alves Cândido.

os meses do ano de 2012³⁵. Com relação a questão da vigência e da validade da outorga, utilizou-se a validação do especialista da COMPESA para validar as informações da base de dados das agências. O que ocorre muitas vezes é que os atos de outorga mesmo não estando renovados continuam a ser usados pela Companhia.

Em todos os outros tipos de usos utilizaram-se os valores de retirada mensais dados nos termos de outorga como sendo os valores das demandas requeridas na área de estudo para o ano de 2012. Além de não termos outras fontes de informação alternativas, no caso das Indústrias, segundo informações dos próprios técnicos das agências, os usuários industriais costumam ser mais conservadores nas solicitações de outorgas, por receio de haver sempre a possibilidade de uma cobrança. Com relação à validade e a vigência das outorgas industriais, da mesma forma que para as outorgas de irrigação, utilizamos todas as outorgas, mesmo as que tinham processos com datas posteriores ao ano estudado e mesmo as vencidas. A explicação é a mesma do caso da irrigação: muitas vezes os usuários iniciam o uso antes mesmo de terem seu processo aprovado, além de algumas vezes continuarem com acesso à captação mesmo após o fim da vigência da outorga. Como não tínhamos forma de assegurar quais as outorgas realmente estavam se constituindo em demandas no período de 2012, decidimos por incluir todas. Duas observações também são importantes: 1) os dados da ANA/APAC utilizados já eram filtrados para não incluir outorgas canceladas, isto é, as que tiveram o pedido por outorga negado. 2) após o vencimento da outorga o outorgante pode pedir por sua renovação o que gera uma “nova” outorga. Para evitar duplicidade e desatualização realizou-se uma verificação de forma a considerar apenas as informações mais atualizadas.

Um problema que requereu tratamento foram as outorgas do tipo industrial identificados pelo CNAE 2.0 nas seguintes atividades econômicas (total de 15): fabricação de álcool, fabricação de açúcar em bruto e fabricação de açúcar de cana refinado. As indústrias de Pernambuco, nessas atividades, incluem no seu processo produtivo plantio e a irrigação da cana de açúcar, o que se constitui na verdade em agricultura irrigada. O que ocorre é que em geral o proprietário da indústria é também o proprietário das terras e pede apenas uma outorga para as duas atividades econômicas. Assim, fez-se necessário separar a utilização da água utilizada no processo industrial e a água utilizada na irrigação da cana de açúcar. Para fazer uma estimativa do quantitativo utilizado em cada atividade, foram utilizados os coeficientes técnicos para a

³⁵ Segundo os dados da COMPESA o ano de 2012 foi a maior retirada de água para o setor de água e esgoto entre o ano de 2012-2015.

indústria visto em ANA (2017)³⁶. As outorgas em que a finalidade de uso é “aproveitamento hidroelétrico” foram retirados do conjunto estudado por não terem se encontrado dados disponíveis do aproveitamento. Como são outorgas de uso não consuntivo isto não influencia nos resultados da alocação.

O total de outorgas analisado nas quatro bacias estudadas foram 575 outorgas. Esse conjunto de outorgas foi então agregado para se constituir nos nós de demanda da rede, conforme será explicitado em seção adiante. Para tal, foi necessário inicialmente associar cada uma dessas outorgas aos setores econômicos do modelo insumo-produto (MIP) para posterior integração. Foi feito um estudo pelo professor Ignácio Tavares da UFPB, que conseguiu a partir dos CNPJ's e CPF's dos usuários a quem se deu a outorga, identificar o setor econômico do mesmo, usando a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE 2.0)³⁷. Algumas delas, no entanto, não puderam ser identificadas nesse primeiro processo, sendo requerido um tratamento adicional. Os setores associados que requereram tratamento adicional se encontram na Tabela 4.

³⁶ Os coeficientes são disponibilizados pelas diferentes atividades econômicas do CNAE 2.0, com esses coeficientes podemos saber a quantidade de litros de água utilizados pela indústria por número de empregados e por dia, consequentemente para calcularmos a quantidade de água utilizada na indústria em um mês precisamos saber o número de empregados da indústria e o número de dias. Para calcularmos o número de dias foram utilizadas as informações da outorga da base da APAC/ANA, para o número de empregados foi utilizado a base de dados da Federação das Indústrias do Estado de Pernambuco (FIEPE) que pode ser visto no site http://fiepe.com.br/cadastroindustrial/fiepe_dashboard/ e quando não temos informação foi feito uma interpolação com os dados de número de pessoas ocupadas do banco de tabelas estatísticas do SIDRA-IBGE.

³⁷ O CNAE é o sistema de informação oficial do IBGE para identificação da empresa jurídica pelo setor econômico.

Tabela 4: Classificação da atividade econômica (CNAE 2.0) pela finalidade de uso e cultura irrigada.

Finalidade de Uso	Cultura Irrigada	Grupo/Classe CNAE 2.0
Mineração-Extração de Areia/Cascalho em Leito de Rio	-	Extração de pedra, areia e argila
Aquicultura em Tanque Escavado	-	Aquicultura em água doce
Criação animal	-	Pecuária
Irrigação	Milho	Cultivo de cereais
Irrigação	Cana-de-açúcar	Cultivo de cana-de-açúcar
Irrigação	Goiaba	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Graviola	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Maracujá	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Tangerina	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Banana	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Mamão	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva
Irrigação	Coco Verde	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva

Ademais, como mencionado anteriormente, também requereram tratamento as quinze outorgas dadas a indústrias do setor sucro-alcooleiro em que foi necessária uma estimativa separada do quantitativo da água utilizado no processo industrial e da utilizada para a irrigação da cana de açúcar. Assim, cada uma dessas outorgas foi considerada como sendo duas outorgas em separado, uma outorga para o uso industrial com a estimativa da água bruta utilizada na indústria e uma outra de uso agrícola da cana com a estimativa de água bruta utilizada na irrigação.

Nós de Demanda (Extraído do Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES):

Uma vez consolidadas e ajustadas as informações das outorgas a se considerar como demandas na área de estudo, passou-se a identificar os nós de demanda que constituirão a rede de nós e links. Um nó de demanda da rede de nós e links neste estudo, é obtido ao se agregar as outorgas consolidadas conforme explicado acima que atendam aos seguintes critérios: estejam no mesmo município, sejam do mesmo setor econômico (CNAE) e retirem água que afete o balanço hídrico do mesmo nó de oferta.

O HEAL System tem ferramentas para apoiar a identificação dos nós de demanda, uma vez que as outorgas ANA/APAC ficam disponibilizadas no sistema como uma camada georreferenciada, pois o Sistema Nacional de Informações dos Recursos Hídricos (SNIRH) é integrado ao mesmo. Além disso, há camadas também com os limites municipais e a base de dados com os nós de oferta identificados anteriormente. Como exemplo, a Figura 26 mostra a informação que o HEAL System apresenta sobre uma outorga presente na base da ANA/APAC.

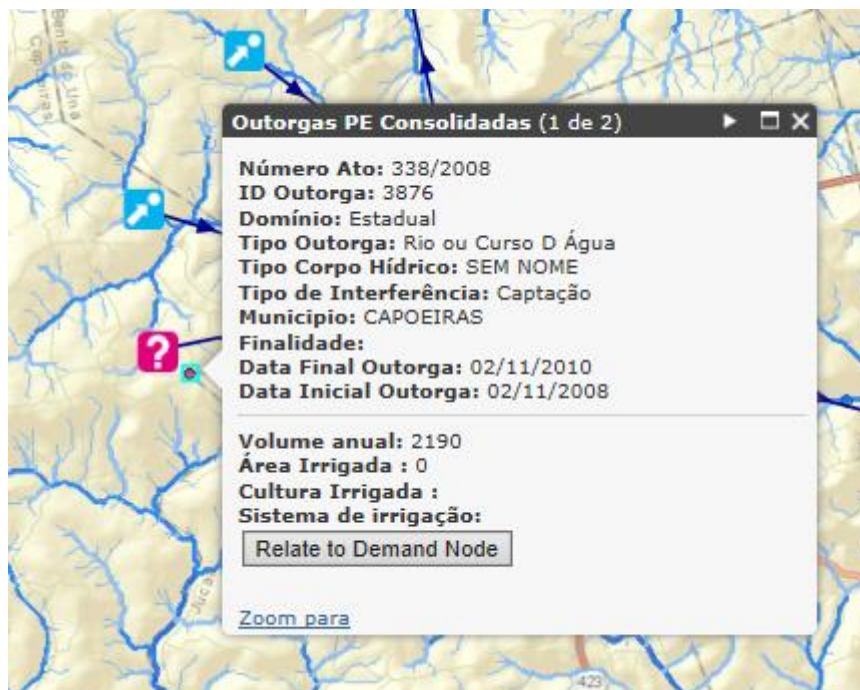


Figura 26: HEAL System mostra uma caixa com informações de uma outorga presente no layer lido no HEAL. Fonte: HEAL System.

Além de apresentar as informações das outorgas cadastradas, o HEAL também possibilita que o modelador, através de ferramentas de geoprocessamento, possa associar as outorgas visualizadas da base da ANA/ APAC com os nós de oferta, cujo balanço é afetado pelas suas retiradas. A partir de um nó de oferta identificado e representado pelo quadrado azul a jusante na rede, a ferramenta sombreia uma área em que outorgas aí incluídas, representam as retiradas que impactam no balanço hídrico do referido nó. A Figura 27 mostra o resultado da query, dada pelo HEAL, com as outorgas que estão associadas ao mesmo nó de oferta.

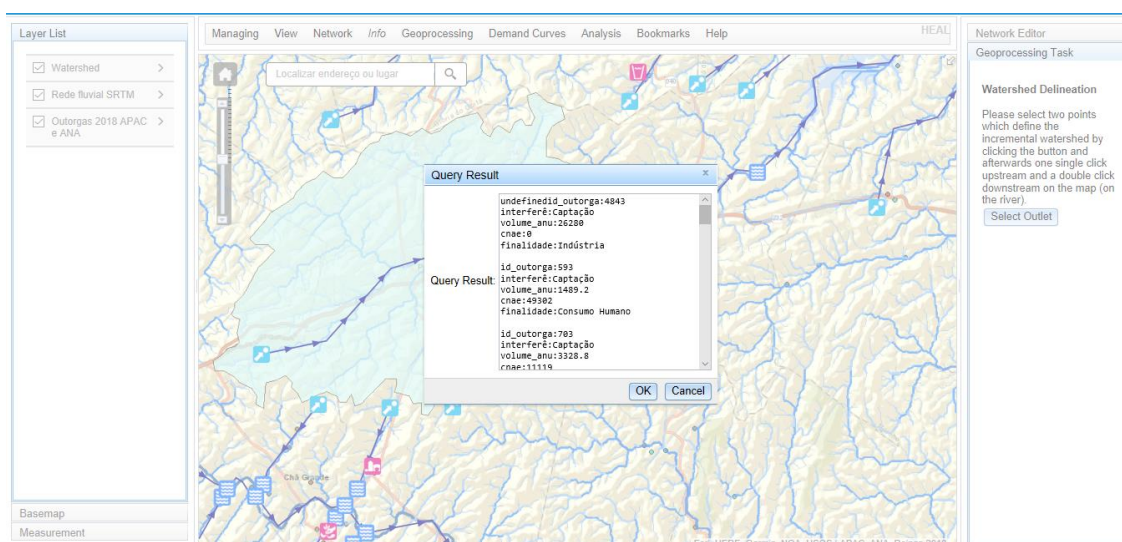


Figura 27: Exemplo de resultado da query do Heal System. Fonte: Heal System.

Essas outorgas, que impactam no mesmo nó de oferta, caso estejam também num mesmo município e tenham o mesmo CNAE se constituirão num nó de demanda da rede a ser conectado ao referido nó de oferta. A conexão do nó de demanda ao nó fonte associado é feita manualmente no HEAL System, através da inclusão de um link que indicará a conexão do nó de demanda assim obtido ao associado nó de oferta.

Os atributos do nó de demanda, uma vez identificado pelos critérios mencionados, são obtidos a partir dos dados de outorga devidamente agregados: O Número de identificação do nó de demanda é gerado pelo HEAL System e as informações de município, Código CNAE, demanda anual e mensal de água agregadas são alimentadas na base de dados do HEAL. Ademais, no campo de observações inserem-se os números dos atos das outorgas que o nó agregou. A Figura 28 abaixo mostra um desses nós de demanda e alguns de seus atributos.

Demand Nodes (Water User)	
Demand ID:	34025
Project ID:	1.605
User Type:	Outros
User/Demand Name:	
CNAE:	1.500
Source Municipality:	Capoeiras
Total Demand [m³]	
Yearly water demand:	2.190
Return Coef.:	
Demand Curve	
Polynom Fator A-	

Figura 28: Tela de entrada de atributos para um nó de demanda. Fonte: Heal System.

No caso do Abastecimento Humano deve-se ressaltar que, ao contrário dos demais usos, que em geral agregam várias outorgas num único nó de demanda, uma só outorga poderá gerar mais de um nó de demanda pois a demanda por abastecimento público será definida pela Estação de Tratamento de Água (ETA) e o seu município associado. Isto será necessário para que possam ser integradas as alocações a esses nós e a MIP. No caso de que uma mesma outorga ou retirada de um mesmo manancial alocue água para duas ETAs em municípios diferentes, dois nós de demanda foram criados. Além dos valores captados por mês em 2012, caracterizando esses nós

de demanda, dado pelas informações do setor de Produção da COMPESA, nestes nós de abastecimento público representados por ETAs constará ainda o seu município de localização. A Figura 29 mostra um exemplo de preenchimento de dados de nós de demanda e seus atributos.

The figure displays two screenshots of the 'Demand Nodes (Water User)' dialog box, overlaid on a map background. The left screenshot shows the general node information, and the right screenshot shows the monthly demand data.

Left Screenshot: Demand Nodes (Water User) - General Information

Demand ID:	40420
Project ID:	1.605
User Type:	Irrigação
User/Demand Name:	
CNAE:	1.113
Source Municipality:	Jurema
Total Demand [m³]	
Yearly water demand:	29.815
Return Coef.:	
Demand Curve:	
Polynom Factor A:	

Right Screenshot: Demand Nodes (Water User) - Monthly Demand Data

Demand January:	7.711,27
Demand February:	6.752,68
Demand March:	1.517,89
Demand April:	0
Demand May:	0
Demand June:	0
Demand July:	0
Demand August:	0
Demand September:	0
Demand October:	0

Figura 29: Exemplo dos atributos de um nó de demanda de irrigação no Heal System. Fonte: Heal System.

Pela construção do nó de demanda a informação do município em que está localizado, atividade econômica, nó de oferta que está associado e as outorgas representadas são consequências da própria construção do nó.

Os nós de oferta e demanda foram construídos na rede de nós e links utilizando o Heal System e suas camadas como foi descrito na seção anterior.

Finalmente, uma vez incorporadas as representações e atributos dos nós de oferta e demanda da rede ao HEAL System, utiliza-se uma das funções do Sistema de Informações Geográfico, denominada *snapping* para, de uma forma fácil, conectar os nós com links. Além disso, o sistema aceita também pontos próximos. O link não precisa ser necessariamente uma linha reta, pode ser traçado também uma linha com vários vértices para seguir um rio ou adutora, por exemplo. A direção de fluxo é escolhida pelo usuário, em caso de inconsistências o sistema alerta e o usuário podem alterar o link com a direção de fluxo ao contrário.

Assim, é gerada a rede de nós e links, e a partir dela pode ser construído o modelo de otimização que vai alocar a água a partir dos nós de oferta aos nós de demanda.

A rede de nós e links da área de estudo resultou em 361 nós de demanda sendo 164 nós de demanda da agricultura, 70 nós de demanda do setor água e esgoto, 48 nós de demanda da indústria, 18 nós de demanda do setor pecuária, pesca e aquicultura e 61 nós de demanda dos outros setores.

Com relação aos nós de oferta os quantitativos são apresentados na tabela abaixo:

Nós de oferta				
Bacias	Nós reservatórios	Nós inflow	Nós stream	Total
Capibaribe	13	37	69	119
Ipojuca	7	23	44	74
Sirinhaém	2	27	58	87
Una	6	28	55	89
Total	28	115	226	369

Figura 30: Quantitativo de nós de oferta por bacia e tipo de nó. Fonte: Heal System e elaborado pelo autor.

3.3 A REDE DE NÓS E LINKS SIMPLIFICADA

A rede de nós e links da área de estudo, cujos dados foram armazenados na plataforma HEAL, foi simplificada para ser utilizada nesta tese. Assim, foram definidos nesta simplificação 59 nós de oferta, sendo eles (16 reservatórios, 28 *stream*'s e 15 *inflows*) e 273 nós de demanda, sendo (102 da agricultura, 57 de água e esgoto, 43 da indústria, 16 da pecuária, pesca e aquicultura e 55 dos outros setores) representando as bacias do Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Como a ideia deste trabalho é propor e testar uma metodologia de integração entre os modelos de otimização e a MIP, decidiu-se agregar os nós de oferta e demanda e suas informações associadas, já existentes na base de dados do HEAL, para resultar em uma rede menos complexa e facilitar a obtenção do ótimo.

3.3.1 Estrutura dos nós de oferta

Foram utilizados 59 nós de oferta que são divididos em três tipos: são 16 nós do tipo reservatório em que podem ser utilizados para armazenamento de água bruta superficial, 28 nós do tipo *stream* (nó de passagem) onde ocorre somente a passagem de água do rio, isto é, nesses nós a água que não for retirada é totalmente liberada para o próximo nó a jusante e 15 nós do tipo *inflow* que representam o início dos rios principais e afluentes modelados.

A bacia do Capibaribe foi representada por 27 nós de oferta, sendo 9 reservatórios, 12 *stream*'s e 6 *inflow*'s. O esquemático por parte da oferta da bacia está na Figura 31.

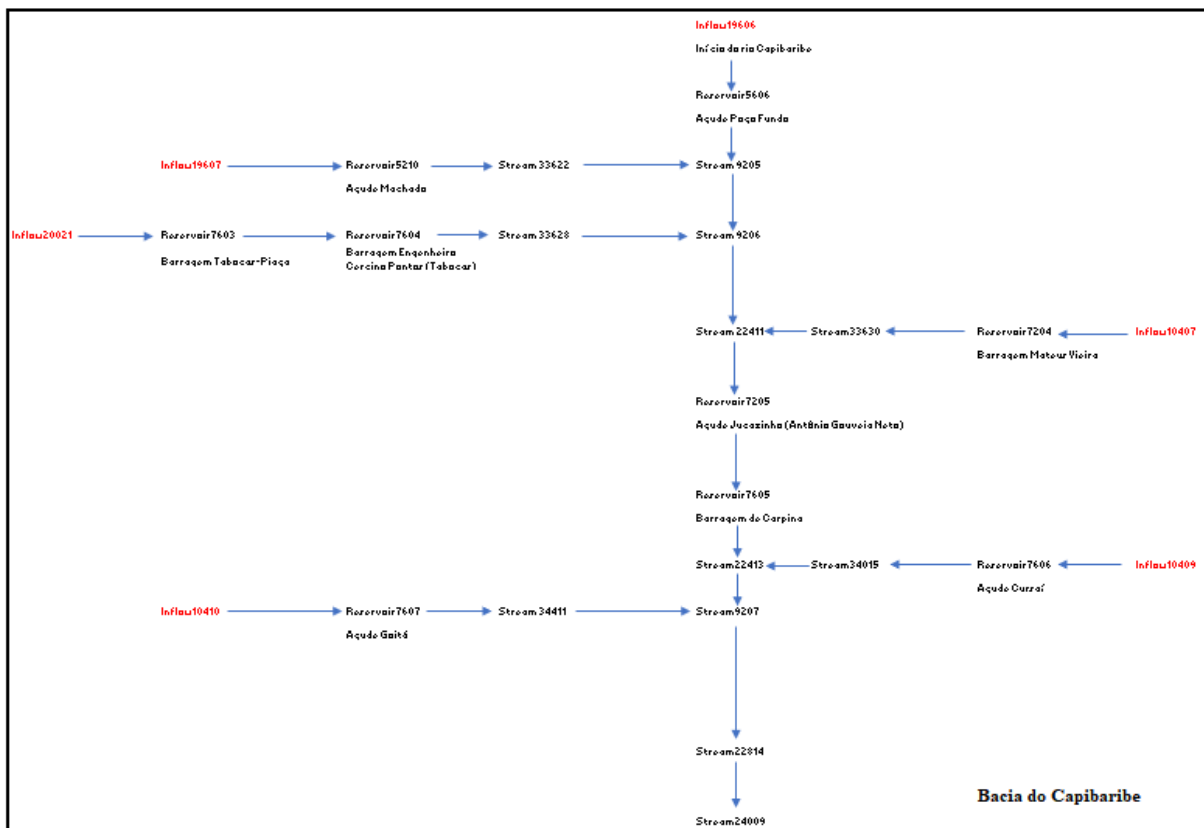


Figura 31: Esquemático utilizado para a bacia do Capibaribe. Fonte: Elaboração própria do autor.

As restrições consideradas no modelo de otimização desenvolvido sobre a rede simplificada para os reservatórios foram a de capacidade máxima e de volume morto. A capacidade máxima é um limite físico para armazenamento de água no reservatório. O volume morto é o nível do reservatório que fica abaixo da tomada de água do reservatório, assim quando o reservatório chega ao volume morto, a água não consegue ser bombeada para a utilização.

A Figura 32 mostra a capacidade máxima e volume morto de cada um dos onze reservatórios considerados na rede simplificada da bacia do Capibaribe. O açude Jucazinho é o maior reservatório de toda a área de estudo com infraestrutura que pode armazenar 327 milhões de m³.

Bacia do Capibaribe		
Reservatórios	Capacidade máxima em milhões de m ³ /ano	Volume morto em milhões de m ³ /ano
Açude Cursai	13,0	0,5
Açude Goitá	52,5	0,8
Açude Jucazinho (Antônio Gouveia Neto)	327,0	7,1
Açude Machado	1,6	0,1
Açude Poço Fundo	27,8	0,3
Barragem de Carpina	270,0	0,7
Barragem Engenheiro Cercino Pontos (Tabocas)	13,6	0,2
Barragem Mateus Vieira	2,8	0,8
Barragem Tabocas-Piaça	1,2	0,03

Figura 32: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Capibaribe
Fonte: APAC³⁸.

A bacia do Ipojuca foi representada por oito nós de oferta, sendo dois reservatórios, quatro *stream*'s e dois *inflow*'s. O esquemático por parte da oferta da bacia está na Figura 33.

³⁸ Os valores de capacidade máxima e volume morto dos reservatórios pode ser encontrado em http://200.238.109.99:8080/apacv5/fichareservatorio_web/fichareservatorio_web.php

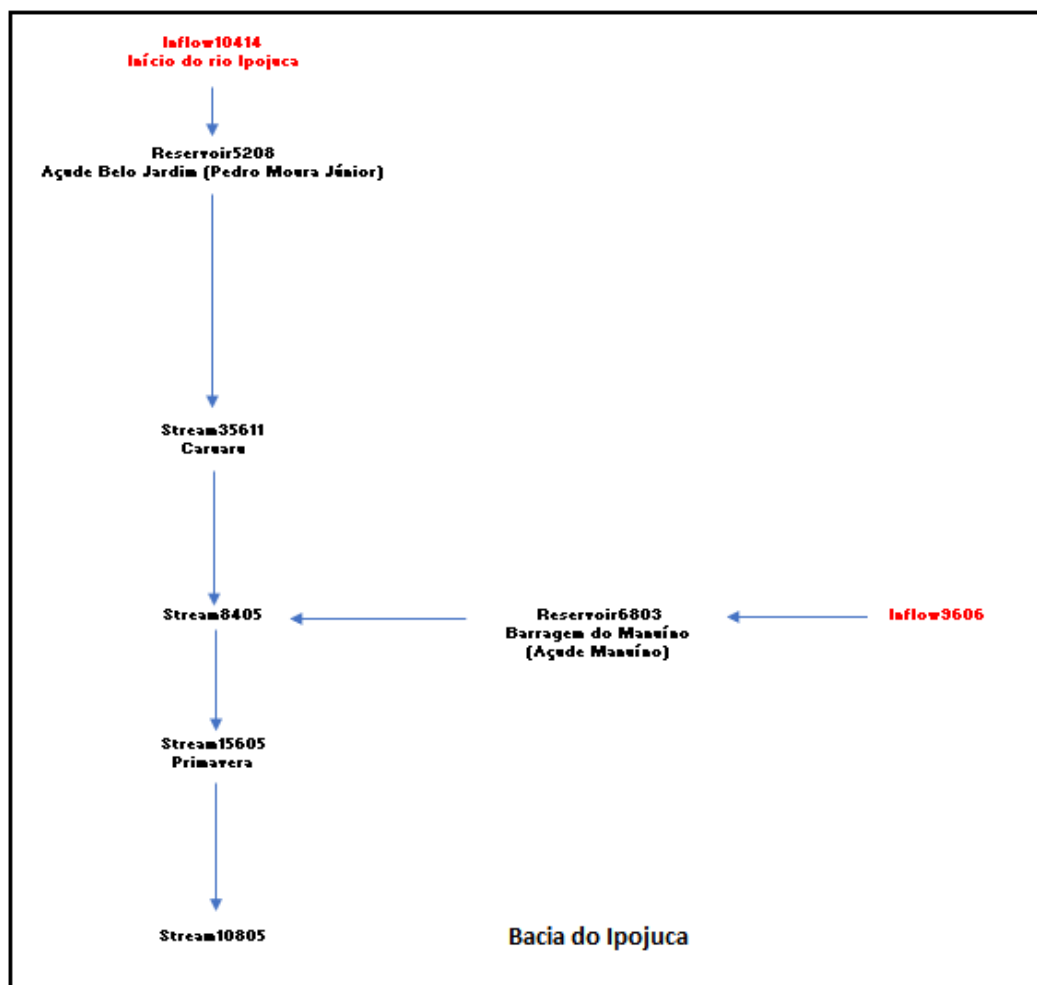


Figura 33: Esquemático utilizado para a bacia do Ipojuca. Fonte: Elaboração própria do autor.

Os reservatórios que são representados na bacia do Ipojuca são os reservatórios do Belo Jardim e o Manuino. O reservatório Belo Jardim é o maior reservatório da bacia com uma capacidade de acumulação de 30,7 milhões.

Bacia do Ipojuca		
Reservatórios	Capacidade máxima em milhões de m ³ /ano	Volume morto em milhões de m ³ /ano
Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)	30,7	1,9
Barragem do Manuino (Açude Manuino)	2,0	0,001

Figura 34: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Ipojuca.
Fonte: APAC³⁹.

A bacia do Una foi representada por dezessete nós de oferta, sendo quatro reservatórios, oito *stream*'s e cinco *inflow*'s. O esquemático por parte da oferta da bacia está na Figura 35.

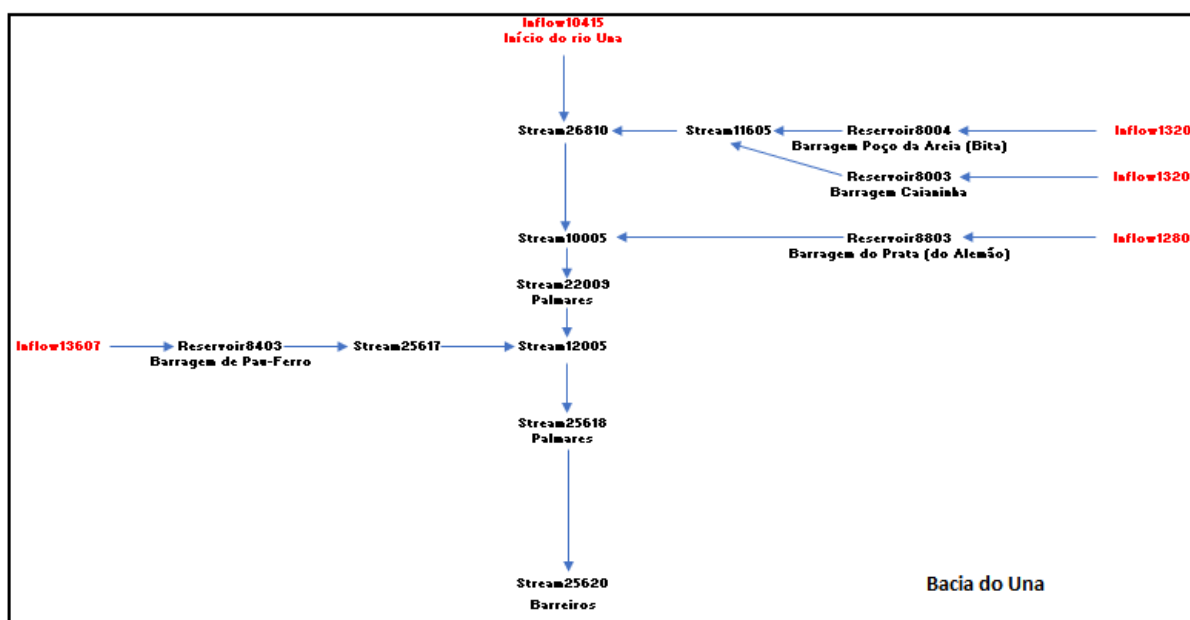


Figura 35: Esquemático utilizado para a bacia do Una. Fonte: Elaboração própria do autor.

Os quatro reservatórios representados na bacia do Una⁴⁰ são: barragem do Prata (do Alemão), barragem do Pau-Ferro, barragem do Poço de Areia (Bita) e barragem do Caianinha. Sendo o maior reservatório da região a barragem do Prata (do Alemão) com capacidade de acumulação de 42,1 milhões de m³/ano.

³⁹ Os valores de capacidade máxima e volume morto dos reservatórios pode ser encontrado em http://200.238.109.99:8080/apacv5/fichareservatorio_web/fichareservatorio_web.php

⁴⁰ A barragem de Serro Azul é um grande reservatório na bacia do Una com capacidade de acumulação de 303 milhões de m³ por ano. O início do funcionamento do reservatório ocorreu em 2017 e, portanto, posterior à análise, realizada nesse estudo que compreende o ano de 2012.

Bacia do Una		
Reservatórios	Capacidade máxima em milhões de m ³ /ano	Volume morto em milhões de m ³ /ano
Barragem do Prata (do Alemão)	42,1	1,6
Barragem de Pau-Ferro	12,2	0,5
Barragem Poço da Areia (Bita)	2,4	0,1
Barragem Caiarinha	1,4	0,02

Figura 36: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Una. Fonte: APAC⁴¹.

A bacia do Sirinhaém foi representada por sete nós de oferta, sendo um reservatório, quatro *stream's* e dois *inflow's*. O esquemático por parte da oferta da bacia está na Figura 37. O único reservatório representado na bacia é o reservatório da Amora Grande que tem capacidade de acumulação de água bruta superficial de 2 milhões de m³ por ano.

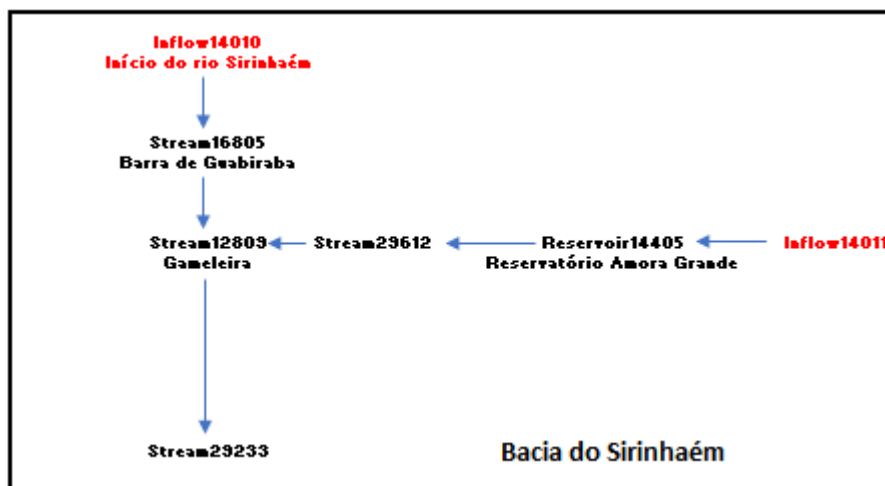


Figura 37: Esquemático utilizado para a bacia do Sirinhaém. Fonte: Elaboração própria do autor.

⁴¹ Os valores de capacidade máxima e volume morto dos reservatórios pode ser encontrado em http://200.238.109.99:8080/apacv5/fichareservatorio_web/fichareservatorio_web.php

Bacia do Sirinhaém		
Reservatórios	Capacidade máxima em milhões de m ³ /ano	Volume morto em milhões de m ³ /ano
Reservatório Amora Grande	2,0	0,004

Figura 38: Capacidade máxima e volume morto dos reservatórios da bacia do Sirinhaém.
Fonte: APAC⁴².

3.3.2 Estrutura dos nós de demanda

A rede de nós e links da área de estudo incorporou as informações de 575 outorgas agregando-as em nós de demanda, conforme critérios definidos em seção anterior (outorgas com mesmo setor econômico, mesmo município e mesmo nó de oferta em que se capta a água se tornaram um mesmo nó de demanda, no caso do abastecimento público, cada ETA de cada município tornou-se um nó de demanda). Para a rede de nós simplificada, esses nós de demanda da área de estudo foram agregados em torno apenas dos nós de oferta considerados na rede simplificada descritos na seção anterior. Disto, resultaram 273 nós de demanda nas quatro bacias.

Cada nó de demanda possui um único ponto de captação da água bruta superficial, isto é, um nó de oferta onde ocorre a retirada. Na Figura 39 mostra os nós de demanda em rosa que retiram água do reservatório em azul.

⁴² Os valores de capacidade máxima e volume morto dos reservatórios pode ser encontrado em http://200.238.109.99:8080/apacv5/fichareservatorio_web/fichareservatorio_web.php

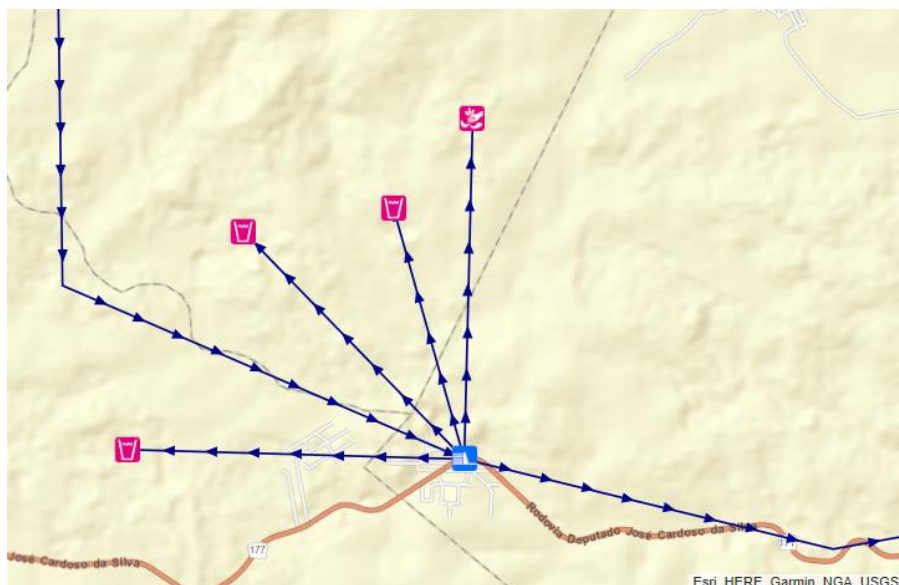


Figura 39: Exemplo da ligação entre os nós de demanda e os nós de oferta. Cada nó de demanda (rosa) retira a água de um único nó de oferta (azul). Fonte: Heal System e elaboração própria do autor.

Na rede de nós e links da área de estudo tínhamos no total 369 nós de oferta que foram agregados na rede simplificada para 59 nós, com a diminuição da quantidade de nós de oferta. Com o critério de agregação dos nós de demanda adotado (mesmo nó de oferta, mesmo setor econômico e mesmo município) a quantidade de nós de demanda diminuiu dos 361 nós de demanda da rede completa para 273 nós de demanda da rede simplificada.

A Tabela 5 mostra o quantitativo de nós de demanda por bacia resultantes na rede de nós e links simplificada e por tipo de uso (agregado⁴³ para os usos "agricultura", "água e esgoto", "indústria", "pecuária, pesca e aquicultura" e "outros").

Tabela 5: Quantitativo dos nós de demanda por tipo de uso e por bacia. Fonte: Elaboração própria do autor.

Nós de demanda						
Bacias	Agricultura	Água e esgoto	Indústria	Pecuária, Pesca e Aquicultura	Outros	Total
Capibaribe	18	16	11	4	18	67
Ipojuca	15	11	13	3	12	54
Sirinhaém	36	11	8	3	5	63
Una	33	19	11	6	20	89
Total	102	57	43	16	55	273

⁴³ Agregação dos 76 setores econômicos diferentes que estão na Tabela 8 do Apêndice A.

3.4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE ÁGUA SOBRE A REDE DE NÓS E LINKS SIMPLIFICADA

Modelos de gestão de água em geral tentam identificar os impactos de um choque de alocação ou a instalação de uma nova estrutura hídrica nos diferentes usuários. Modelos de otimização de alocação de recursos hídricos podem utilizar critérios hidrológicos e econômicos. O critério escolhido é representado através de uma função-objetivo, que pode ser maximizada ou minimizada, uma vez atendidas as restrições, que podem ser físicas, ambientais e institucionais. As restrições podem ser de desigualdade ou igualdade. O conjunto que satisfaz a todas as restrições, simultaneamente, é chamado de conjunto viável. Caso esse conjunto seja um conjunto compacto (fechado e limitado) sempre existe uma solução ao problema de otimização, mas caso esse conjunto não seja fechado ou é ilimitado nem sempre existe uma solução do problema. Quando a função objetivo é linear e todas as restrições são lineares, temos o chamado Problema de Programação Linear (PPL) e a solução, quando existe, está em um vértice ou em suas combinações convexas do conjunto viável, que será sempre convexo. O PPL possui diversos algoritmos computacionais para se encontrar uma solução, um dos mais populares é o Simplex desenvolvido primeiramente em Dantzig (1951). Existem diversos softwares que disponibilizam algoritmos computacionais (*solvers*) que resolvem PPLs e outras modalidades de problemas de otimização, tais como: a programação inteira e a programação não linear (PNL). Exemplos de softwares que disponibilizam solvers para resolver problemas de otimização baseados em uma rede de nós e links são dados por (Harou et al., 2009): *General Algebraic Modeling System* (GAMS), *A Mathematical Programming Language* (AMPL) e *Advanced Interactive Multidimensional Modeling System* (AIMMS).

O software de otimização que foi utilizado nessa tese é o *General Algebraic Modeling System* (GAMS), que disponibiliza *solvers* para resolução de diversos problemas de otimização. O modelo de otimização foi construído sobre a rede de nós e links simplificada, descrita acima, e as equações a serem descritas abaixo (restrições e função-objetivo). O *solver* utilizado foi o CPLEX, que é disponibilizado no GAMS para resolver problemas de PPL.

Sejam T o conjunto de todos os meses⁴⁴ do modelo de otimização, M o conjunto de nós de oferta da rede de nós e links e L o conjunto de nós de demanda.

⁴⁴ O conjunto T é dado por $T = \{\text{Jan2012, Fev2012, Mar2012, Abr2012, Maio2012, Jun2012, Jul2012, Ago2012, Set2012, Out2012, Nov2012, Dez2012}\}$.

Sejam M_1 o conjunto dos nós de oferta do tipo *stream* (“nós de passagem”), M_2 o conjunto dos nós de oferta do tipo reservatórios M_3 o conjunto dos nós de oferta do tipo *inflow*. Observe que $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3$.

Definimos a variável positiva⁴⁵ $R(m, t)$ como o valor da liberação de água bruta superficial que ocorre em cada nó de oferta $m \in M$ e em cada período $t \in T$.

Definimos a variável positiva $D(l, t)$ como o valor da água bruta superficial alocada em cada nó de demanda $l \in L$ e em cada período $t \in T$. Observe que essa variável é a água bruta superficial de fato alocada no nó de demanda e que, pode assim, diferir do valor de água bruta que é demandado pelo nó no período.

Definimos a variável positiva $S(m, t)$ como o volume do reservatório em cada nó de oferta do tipo reservatório $m \in M_2$ e em cada período $t \in T$.

Definimos a variável $Q(m, t)$ que representa o valor líquido que afluiu de água em cada nó de oferta $n \in M$ e em cada período $t \in T$ contabilizando as liberações dos seus nós de oferta anteriores e as alocações feitas aos seus nós de demanda associados

Definimos o parâmetro $Supply(m, t)$ como o valor da oferta adicional de água bruta superficial em cada nó de oferta $m \in M$ e em cada período $t \in T$. Esse valor corresponde a região da bacia incremental associado ao nó de oferta $m \in M$ e o período $t \in T$ de acordo com a vazão da modelagem hidrológica devidamente regionalizado.

Definimos o parâmetro $Capacidade(m)$ que representa para cada nó de oferta $m \in M_2$ o limite máximo de volume que pode ser acumulado no reservatório m .

Definimos o parâmetro $Volume_morto(m)$ que representa para cada nó de oferta $m \in M_2$ o limite mínimo de volume que pode ser acumulado no reservatório m .

Definimos o parâmetro $demand_maxima(l, t)$ como o valor demandado em cada nó de demanda $l \in L$ e em cada período $t \in T$.

Definimos ainda o conjunto de links da rede de nós e links, isto é, as ligações entre os diferentes nós de demanda e oferta. Esses links são representados por dois tipos no código em GAMS: o primeiro tipo é o nó de oferta que recebe água de outro nó de oferta, um exemplo é

⁴⁵ Isto é, que só pode assumir valores não negativos.

Stream34015.Reservoir7606 (ver diagrama esquemático na Figura 31) que significa que o nó de oferta *Stream34015* recebe água do nó oferta *Reservoir7606*. O segundo tipo é o nó de demanda que recebe água do nó de oferta, um exemplo é *Nodemanda_196.Reservoir8803* (ver Figura 39) que significa que o nó de demanda *Nodemanda196* recebe água do nó de oferta *Reservoir8803*. É importante observar que cada nó de demanda retira água de apenas um nó de oferta, isto é, existe somente um link entre o nó de demanda a um nó de oferta. Isto não impede que diferentes nós de demanda retirem água do mesmo nó de oferta.

3.4.1 Restrições do modelo

A variável $Q(n,t)$ precisa satisfazer a equação (1) em cada nó de oferta $n \in M$ e em cada período $t \in T$:

$$Q(n,t) = Supply(n,t) + \sum_{m \in M} R(m,t) - \sum_{l \in L} D(l,t) \quad (1)$$

Onde:

- $R(m,t) = 0$ Se o nó de oferta m não libera água para o nó de oferta n e $R(m,t) > 0$ se o nó de oferta m libera água para o nó de oferta n no período t .
- $D(l,t) = 0$ Se o nó de demanda l não está associado ao nó de oferta n , isto é, não retira água do nó n e $D(l,t) \geq 0$ se o nó de demanda l está associado ao nó de oferta n , isto é, pode retirar água do nó n .

Para cada nó de oferta $m \in M_1$, isto é, cada nó de oferta do tipo *stream* (“nós de passagem”) e em cada período $t \in T$ temos a equação (2):

$$R(n,t) = Q(n,t) \quad (2)$$

Essa equação quer dizer que, para cada nó de oferta do tipo *stream*, toda a água não alocada nos nós de demanda é liberado para o próximo nó de oferta.

Para cada nó de oferta $m \in M_2$, isto é, cada nó de oferta do tipo reservatório e em cada período $t \in T$ temos a equação (3):

$$S(m,t) = S(m,t-1) + Q(m,t) - R(m,t) \quad (3)$$

Onde:

- $S(m,0)$ é o volume inicial do reservatório.

A infraestrutura hídrica do modelo é representada por desigualdades do limite de capacidade de cada reservatório e volume morto.

Se o nó de demanda m é do tipo reservatório temos a restrição de limites de capacidade dada por:

$$Volume_morto(m) \leq S(m, t) \leq Capacidade(m) \quad (4)$$

para todo período $t \in T$.

Outra restrição ao modelo é que, para todo nó de demanda l e para todo período t o valor alocado no nó de demanda não pode ser maior que a água demandada pelo nó de demanda naquele período. Essa restrição é resumida na desigualdade abaixo:

$$D(l, t) \leq demanda_maxima(l) \quad (5)$$

3.4.2 Função objetivo

A função objetivo representa o critério a ser otimizado. Na modelagem aqui proposta vai ser simular a atuação das agências que, ao outorgar os direitos de uso aos demandantes de recursos hídricos, procuram atender a todos de igual forma, tentando aproximar o máximo possível o valor alocado ao valor demandado em cada nó de demanda. Assim, podemos representar a função objetivo dessa modelagem como:

$$\text{Função objetivo} = \sum_{l \in L, t \in T} D(l, t) \quad (6)$$

Com essa função objetivo o gestor que aloca água em cada nó de demanda tenta maximizar o atendimento de todas as demandas com peso igual em cada nó, sendo restrita a alocação a demanda máxima conforme restrição na equação (5).

3.4.3 Problema de otimização linear e solução

Como pode ser visto pela equação (6) a função objetivo desse problema é linear. O problema completo de otimização linear da alocação do recurso hídrico entre os nós de demanda é dado por:

$$\max_{\{D(l, t)\}} \sum_{l \in L, t \in T} D(l, t) \quad (7)$$

sujeito a (1), (2), (3), (4) e (5) para todo $l \in L$, $t \in T$ e $m \in M$.

A solução desse problema é chamada de solução do problema de otimização determinístico, pois os valores exógenos (parâmetros) são dados e não estão associados a nenhuma probabilidade. Ademais, o modelo é dito ter um “*perfect foresight*”, pois os quantitativos hidrológicos ofertados em cada nó em cada mês no ano estudado são dados e, portanto, as decisões de alocação no primeiro mês já consideram o que ocorrerá no último mês. O modelo utilizou então o software GAMS para encontrar a solução. O modelo em GAMS conta com 6.285 equações e 5.401 variáveis.

3.5 MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO INTER-REGIONAL

A matriz de Insumo-Produto inter-regional é uma extensão da matriz de Insumo-Produto tradicional, com a introdução das relações entre as regiões, exportações e importações que são representadas através do fluxo de bens que se destina ao consumo intermediário e a demanda final (Guilhoto, 2011).

A Figura 40 é uma representação tradicional de uma matriz inter-regional com duas regiões, a saber: a região L e a região M.

		Setores		Y		
		Região L	Região M	L	M	
Setores	Região L	Insumos Intermediários Z^{LL}	Insumos Intermediários Z^{LM}	Demanda final LL	Demanda Final LM	Produção Total Região X^L
	Região M	Insumos Intermediários Z^{ML}	Insumos Intermediários Z^{MM}	Demanda final ML	Demanda Final MM	Produção Total Região X^M
		Imposto Resto do Mundo (M)	Imposto Resto do Mundo (M)	M	M	M
		Impostos Ind. Líq. (IIL)	Impostos Ind. Líq. (IIL)	IIL	IIL	IIL
		Valor Adicionado	Valor Adicionado			
		Produção Total Região L	Produção Total Região M			

Figura 40: Relações entre as regiões em uma matriz de Insumo-Produto inter-regional (com duas regiões). Fonte: Guilhoto (2011) e Ribeiro (2018).

Para representar a metodologia tradicional da matriz inter-regional abordaremos o caso com duas regiões e n setores. A extensão dessa metodologia com r regiões é de fácil compreensão.

Sejam L e M as regiões da matriz de Insumo-Produto⁴⁶. Representamos os fluxos entre essas duas regiões como segue:

z_{ij}^{LL} é o fluxo monetário do setor i para o setor j da região L . Ou seja, é o consumo intermediário do bem do setor i utilizado para a produção do bem do setor j .

z_{ij}^{ML} é o fluxo monetário do setor i e região M para o setor j da região L . Ou seja, é o consumo intermediário do bem do setor i e região M utilizado para produção do bem do setor j da região L .

A representação matricial desses fluxos pode ser representada como:

$$Z = \begin{pmatrix} Z^{LL} & Z^{LM} \\ Z^{ML} & Z^{MM} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Onde:

- Z^{LL} é a matriz do fluxo monetário intrarregional da região L , isto é, $Z^{LL}=[z_{ij}^{LL}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento z_{ij}^{LL} ;
- Z^{MM} é a matriz do fluxo monetário intrarregional da região M , isto é, $Z^{MM}=[z_{ij}^{MM}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento z_{ij}^{MM} ;
- Z^{LM} é a matriz do fluxo monetário inter-regional da região L para a região M , isto é, $Z^{LM}=[z_{ij}^{LM}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento z_{ij}^{LM} ;
- Z^{ML} é a matriz do fluxo monetário inter-regional da região M para a região L , isto é, $Z^{ML}=[z_{ij}^{ML}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento z_{ij}^{ML} .

Pela equação de Leontief temos:

$$X_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{in} + Y_i \quad (9)$$

Onde:

- X_i é o valor da produção do setor i ;

⁴⁶ A abordagem utilizada aqui segue Guilhoto (2011) e Ribeiro (2018).

- z_{ij} é o fluxo monetário do setor i para o setor j , ou seja, é o consumo intermediário do bem do setor i utilizado para a produção do setor j , para todo $j = 1, \dots, n$.
- Y_i é o valor da demanda final do setor i .

Aplicando a matriz com duas regiões temos:

$$x_j^L = z_{j1}^{LL} + z_{j2}^{LL} + \dots + z_{jn}^{LL} + z_{j1}^{LM} + z_{j2}^{LM} + \dots + z_{jn}^{LM} + y_j^L \quad (10)$$

para todo $j = 1, \dots, n$.

Onde:

- x_j^L é o valor da produção bem do setor j produzido na região L ;
- y_j^L é o valor da demanda final do setor j e região L .

Os coeficientes técnicos da matriz intrarregional são:

$$a_{ij}^{LL} = \frac{z_{ij}^{LL}}{x_j^L}$$

$$a_{ij}^{MM} = \frac{z_{ij}^{MM}}{x_j^M} \quad (11)$$

Onde:

- a_{ij}^{LL} é a quantidade que o setor j e região L compra do setor i e região L para a produção de uma unidade monetária do seu bem;
- a_{ij}^{MM} é a quantidade que o setor j e região M compra do setor i e região M para a produção de uma unidade do seu bem.

De forma análoga definimos o coeficiente técnico inter-regional como:

$$a_{ij}^{ML} = \frac{z_{ij}^{ML}}{x_j^L}$$

$$a_{ij}^{LM} = \frac{z_{ij}^{LM}}{x_j^M} \quad (12)$$

Onde:

- a_{ij}^{ML} é a quantidade que o setor j e região L compra do setor i e região M para a produção de uma unidade monetária do seu bem;
- a_{ij}^{LM} é a quantidade que o setor j e região M compra do setor i e região L para a produção de uma unidade do seu bem.

Definimos agora a matriz de coeficientes como:

$$A = \begin{pmatrix} A^{LL} & A^{LM} \\ A^{ML} & A^{MM} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Onde:

- A^{LL} é a matriz dos coeficientes técnicos intrarregional da região L , isto é, $A^{LL}=[a_{ij}^{LL}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento a_{ij}^{LL} ;
- A^{MM} é a matriz dos coeficientes técnicos intrarregional da região M , isto é, $A^{MM}=[a_{ij}^{MM}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento a_{ij}^{MM} ;
- A^{LM} é a matriz dos coeficientes técnicos inter-regional da região L para a região M , isto é, $A^{LM}=[a_{ij}^{LM}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento a_{ij}^{LM} ;
- A^{ML} é a matriz dos coeficientes técnicos inter-regional da região M para a região L , isto é, $A^{ML}=[a_{ij}^{ML}]$ é a matriz em que a linha i e coluna j é o elemento a_{ij}^{ML} .

Utilizando (12), podemos reescrever (10) como:

$$x_j^L = a_{j1}^{LL}x_1^L + a_{j2}^{LL}x_2^L + \dots + a_{jn}^{LL}x_n^L + a_{j1}^{LM}x_1^L + a_{j2}^{LM}x_2^L + \dots + a_{jn}^{LM}x_n^L + y_j^L \quad (14)$$

Isolando x_j^L em (14) temos:

$$\begin{aligned} (1 - a_{j1}^{LL})x_j^L &= a_{j1}^{LL}x_1^L + a_{j2}^{LL}x_2^L + \dots + a_{j(j-1)}^{LL}x_{(j-1)}^L + a_{j(j+1)}^{LL}x_{(j+1)}^L + \dots \\ &\quad + a_{jn}^{LL}x_n^L + a_{j1}^{LM}x_1^L + a_{j2}^{LM}x_2^L + \dots + a_{jn}^{LM}x_n^L + y_j^L \end{aligned} \quad (15)$$

para todo $j = 1, \dots, n$.

A mesma equação em (15) pode ser feita para a região M .

Definimos agora o vetor de produção total inter-regional como:

$$X = \begin{pmatrix} x_1^L \\ \vdots \\ x_n^L \\ x_1^M \\ \vdots \\ x_n^M \end{pmatrix} \quad (16)$$

Definimos agora o vetor de demanda final inter-regional como:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1^L \\ \vdots \\ y_n^L \\ y_1^M \\ \vdots \\ y_n^M \end{pmatrix} \quad (17)$$

Utilizando (16) e (17) podemos reescrever (15) na forma matricial abaixo:

$$(I - A)X = Y \quad (18)$$

onde:

- I é a matriz identidade.

A solução de (18) resulta no sistema de Leontief inter-regional:

$$X = (I - A)^{-1}Y \quad (19)$$

Uma abordagem completa da matriz de Insumo-Produto inter-regional pode ser encontrada em Guilhoto (2011) e Miller e Blair (2009).

3.5.1 Matriz de Insumo-Produto inter-regional desenvolvida para a área de estudo.

A matriz utilizada nessa tese de doutorado é uma matriz inter-regional de nível municipal com 75 regiões e 76 setores. Essa matriz foi desagregada em uma parceria do Professor Doutor Marcelo Pereira da Cunha e do Professor Doutor Joaquim José Martins Guilhoto a partir de uma matriz inter-regional de nível nacional que foi construída usando a metodologia TUPI⁴⁷. Essa metodologia permite que a mesma seja aplicada em qualquer dimensão regional com consistência das contas nacionais e as contas regionais (Guilhoto et al., 2017).

Como foi dito na seção 3.2, identificou-se o setor econômico de cada nó de demanda dos recursos hídricos da área de estudo usando o CNAE 2.0. Na área de estudo constituída pelas quatro bacias foram encontrados 288 diferentes CNAE's⁴⁸. Os municípios do estado de Pernambuco que possuem pelo menos algum percentual de suas áreas nas quatro bacias modeladas, a saber, Capibaribe, Ipojuca, Una e Sirinhaém, são 88, e estão relacionados no Apêndice A, na Tabela 21.

Se utilizássemos todos os 288 setores encontrados e os 88 municípios obteríamos uma matriz inter-regional com 24.480 linhas e 24.480 colunas com um total de aproximadamente 600 milhões de elementos. A regionalização municipal tem uma limitação em quantidade de elementos da matriz. Assim, foi necessária a realização de uma agregação de setores e regiões para diminuir a quantidade de elementos.

A agregação entre os setores foi realizada por Dias e Cunha (Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES) que enquadraram os 288 diferentes CNAE's encontrados na área de estudo em 76 setores econômicos a serem utilizados na MIP. Essa correspondência entre os CNAE's e os setores da MIP pode ser encontrada na Tabela 24 do Apêndice A.

Inicialmente os 88 municípios foram agregados em 71 regiões. Para isso foram feitas as seguintes integrações:

⁴⁷ A metodologia Tabelas de Usos e Produção Inter-regionais – TUPI é um método desenvolvido inicialmente pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA da ESALQ/USP e posteriormente no Núcleo de Estudos Regionais e Urbanos da Universidade de São Paulo – NEREUS, coordenado pelo professor Joaquim Guilhoto. Detalhes dessa construção pode ser encontrado em Guilhoto et al. (2017).

⁴⁸ A relação completa dos 288 diferentes CNAE's encontrados na área de estudo e a agregação correspondente na matriz de Insumo-Produto pode ser visto na Tabela 24 no Apêndice A.

- Três dos 88 municípios foram incluídos na região do Resto de Pernambuco, a saber: Alagoinha, Bom Jardim e João Alfredo. Nesses municípios não existem outorgas de água bruta com captação em nenhuma das quatro bacias estudadas, assim, sem perda de generalidade pudemos fazer a inclusão desses municípios na região Resto de Pernambuco.
- Os municípios: Casinhas, Cumaru, Frei Miguelinho, Passira, Riacho das Almas, Salgadinho, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Vertente do Lério e Vertentes foram agregados numa região única. Foi chamada de agregado Jucazinho. Esses municípios são municípios próximos e pertencem ao sistema integrado (de abastecimento público) Jucazinho, assim sem perda de generalidade consideramos essa uma região da matriz de Insumo-Produto.
- Os municípios: Cachoeirinha, Pesqueira, Sanharó, São Bento do Una e Tacaimbó também foram agregados. Foi chamada de agregado Bitury. Esses municípios são municípios próximos e pertencem ao sistema integrado (de abastecimento público) Bitury, assim sem perda de generalidade consideramos essa uma região da matriz de Insumo-Produto.
- Os municípios: Caetés e Capoeiras foram agregados. Foi chamado de agregado Caetés/Capoeiras. Esses municípios são municípios próximos e pertencem ao sistema integrado (de abastecimento público) Caetés/Capoeiras, assim, sem perda de generalidade consideramos essa uma região da matriz de Insumo-Produto.

Optamos ainda para obter maior benefício da análise de resultados por incluir as regiões do Resto de Pernambuco⁴⁹, Resto do Nordeste e Resto do Brasil. No total foram 75 regiões na MIP agregada para a área de estudo.

3.6 METODOLOGIA DE LIGAÇÃO DA MODELAGEM DE OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E A MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO

Supondo uma economia com r regiões e n setores e supondo ainda que Z é a matriz de Insumo-Produto dessa economia.

Supondo ainda que a matriz de coeficientes técnicos é dada pela matriz abaixo.

⁴⁹ Observe que já citamos essa região na agregação dos 88 municípios da área de estudo.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{1,1}^{1,1} & \dots & \mathbf{a}_{1,n}^{1,r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{a}_{n,1}^{r,1} & \dots & \mathbf{a}_{n,n}^{r,r} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Onde:

- $a_{s,j}^{q,k}$ é o valor do coeficiente técnico do setor s da região q para o setor j da região k .

A matriz de coeficientes técnicos é diretamente derivada da matriz de Insumo-Produto Z .

Representando por Y o vetor coluna da demanda final da matriz de Insumo-Produto:

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_1^1 \\ \mathbf{y}_2^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_n^r \end{pmatrix} \quad (21)$$

Representando por X o vetor de produção final da matriz de Insumo-Produto:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1^1 \\ \mathbf{x}_2^1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n^r \end{pmatrix} \quad (22)$$

Supondo as matrizes Z , Y e X em valor monetário.

Da equação (18) temos $X = AX + Y$. Essa igualdade sempre ocorre na economia, inclusive na presença de choques. Então dado um choque na economia temos:

$$X^0 = AX^0 + Y^0 \text{ e } X^f = AX^f + Y^f \quad (23)$$

Onde:

- X^0 é o vetor inicial da produção final da matriz de Insumo-Produto;
- Y^0 é o vetor inicial da demanda final da matriz de Insumo-Produto;
- X^f é o vetor final da produção final da matriz de Insumo-Produto;
- Y^f é o vetor final da demanda final da matriz de Insumo-Produto.

Consequentemente escrevendo em termos de variação e substituindo em (23) temos:

$$\begin{aligned}
\Delta X &= X^f - X^0 = AX^f + Y^f - AX^0 - Y^0 \\
&= A(X^f - X^0) + Y^f - Y^0 \\
&= A\Delta X + \Delta Y
\end{aligned}
\tag{24}$$

E, portanto:

$$(I - A)\Delta X - \Delta Y = 0 \tag{25}$$

Onde:

- I é a matriz identidade $r * n \times r * n$;

- $\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x_1^1 \\ \Delta x_2^1 \\ \vdots \\ \Delta x_n^r \end{pmatrix}$;

- $\Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta y_1^1 \\ \Delta y_2^1 \\ \vdots \\ \Delta y_n^r \end{pmatrix}$.

A equação (25) é um sistema com $r * n$ equações e $2 * r * n$ variáveis, a saber, as variáveis são: $\{\Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_n^r, \Delta y_1^1, \Delta y_2^1, \dots, \Delta y_n^r\}$.

Para cada setor econômico e região o aumento (ou diminuição) da disponibilidade do recurso hídrico aumenta (ou diminui) a produção do setor pela função de produção. Essa variação da disponibilidade de água pode vir de duas formas: pela variação da água tratada (água encanada) destinada ao setor ou pela variação da água bruta (água do rio) destinada ao setor, sendo que em alguns setores essa variação pode também vir de ambas as formas. Um exemplo são as lavanderias de Toritama em Pernambuco, onde algumas lavanderias utilizam somente água bruta e outras lavanderias utilizam somente água tratada, consequentemente o setor correspondente a lavanderias na região de Toritama utiliza tanto a água bruta como a água tratada.

Para cada setor j e região k temos a variação percentual da produção é dada por:

$$\Delta\% x_j^k = \Delta\%^{AT} x_j^k + \Delta\%^{AB} x_j^k \tag{26}$$

Onde:

- x_j^k é o valor monetário da produção do setor j e região k ;

- $\Delta\%x_j^k$ é a variação percentual do valor x_j ;
- $\Delta\%^{AT}x_j^k$ é a variação percentual do valor x_j^k dada pela variação da água tratada;
- $\Delta\%^{AB}x_j^k$ é a variação percentual do valor x_j^k dada pela variação da água bruta.

Usando as elasticidades de produção podemos reescrever (26) como:

$$\begin{aligned}\Delta\%x_j^k &= \Delta\%^{AT}x_j^k + \Delta\%^{AB}x_j^k \\ &= \varepsilon_{AT,j}^k * \Delta\%AT_j^k + \varepsilon_{AB,j}^k * \Delta\%AB_j^k\end{aligned}$$

De onde temos:

$$\Delta\%x_j^k = \varepsilon_{AT,j}^k * \Delta\%AT_j^k + \varepsilon_{AB,j}^k * \Delta\%AB_j^k \quad (27)$$

Onde:

- AT_j^k é o valor monetário⁵⁰ da água tratada utilizada pelo setor j e região k ;
- AB_j^k é o valor em unidades físicas da água bruta utilizada pelo setor j e região k ;
- $\Delta\%AT_j^k$ é a variação percentual do valor AT_j^k ;
- $\Delta\%AB_j^k$ é a variação percentual do valor AB_j^k ;
- $\varepsilon_{AT,j}^k$ é a elasticidade da produção do setor j e região k com relação a variação de água tratada;
- $\varepsilon_{AB,j}^k$ é a elasticidade da produção do setor j e região k com relação a variação de água bruta.

Por definição de variação percentual temos:

$$\Delta\%x_j^k = \frac{\Delta x_j^k}{x_j^{k,0}} * 100\%; \quad (28)$$

⁵⁰ Os dados em unidades físicas da água tratada (água encanada) para o estado de Pernambuco não nos foi disponibilizado (por setor e região) nessa tese de doutorado, se tivéssemos esses valores poderíamos utilizar a água tratada como variável exógena. Assim optamos pela utilização da água tratada como variável endógena dentro da matriz de Insumo-Produto no setor 56 de água e esgoto como pode ser visto no Apêndice A e, portanto, em valor monetário.

$$\Delta\%AT_j^k = \frac{\Delta AT_j^k}{AT_j^{k,0}} * 100\%;$$

$$\Delta\%AB_j^k = \frac{\Delta AB_j^k}{AB_j^{k,0}} * 100\%$$

Onde:

- $x_j^{k,0}$ é o valor monetário inicial da produção do setor j e região k ;
- $AT_j^{k,0}$ é o valor monetário inicial da água tratada utilizada pelo setor j e região k ;
- $AB_j^{k,0}$ é o valor em unidades físicas da água bruta utilizada pelo setor j e região k ;
- Δx_j^k é a variação do valor x_j ;
- ΔAT_j^k é a variação do valor AT_j^k ;
- ΔAB_j^k é a variação do valor AB_j^k .

Substituindo (28) em (27) temos:

$$\frac{\Delta x_j^k}{x_j^{k,0}} * 100\% = \varepsilon_{AT,j}^k * \frac{\Delta AT_j^k}{AT_j^{k,0}} * 100\% + \varepsilon_{AB,j}^k * \frac{\Delta AB_j^k}{AB_j^{k,0}} * 100\%$$

Multiplicando ambos os lados por $x_j^{k,0}$ e dividindo por 100% temos:

$$\Delta x_j^k = \varepsilon_{AT,j}^k * \frac{\Delta AT_j^k}{AT_j^{k,0}} * x_j^{k,0} + \varepsilon_{AB,j}^k * \frac{\Delta AB_j^k}{AB_j^{k,0}} * x_j^{k,0} \quad (29)$$

Definimos o coeficiente técnico de água tratada como:

$$a_{AT,j}^k = \frac{AT_j^{k,0}}{x_j^{k,0}} \quad (30)$$

Definimos o coeficiente técnico de água bruta como:

$$a_{AB,j}^k = \frac{AB_j^{k,0}}{x_j^{k,0}} \quad (31)$$

Substituindo (30) e (31) em (29) temos:

$$\Delta x_j^k = \frac{1}{a_{AT,j}^k} * \varepsilon_{AT,j}^k * \Delta AT_j^k + \frac{1}{a_{AB,j}^k} * \varepsilon_{AB,j}^k * \Delta AB_j^k \quad (32)$$

A equação (32) mostra a variação da produção do setor j da região k pelas elasticidades de produção, coeficientes técnicos e variação da utilização da água tratada em valor monetário e variação da água bruta em unidades física. Mas a variação da água tratada é um dado não disponibilizado para a nossa modelagem, mas um dado que temos é o valor monetário da produção por setor e região. A modelagem abaixo é para transformar a variação de água tratada por setor e região da equação (32) no valor monetário da produção por setor e região. A elasticidade de produção com relação ao recurso hídrico mede o tamanho do impacto que a variação do recurso hídrico exerce na produção de um setor da economia. Essas elasticidades aqui utilizadas foram distinguidas em dois grupos: a elasticidade de produção com relação a água bruta e a elasticidade de produção com relação a água tratada. Viana (Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES), calculou para a área de estudo esses dois grupos de elasticidades para cada uma das regiões (que estão na área de estudo) da matriz de Insumo-Produto e cada um dos setores da economia que estão na matriz de Insumo-Produto. Existem ainda setores e regiões que, por não utilizarem água tratada e água bruta na sua função de produção, não foram possíveis ser calculados as elasticidades, nesses setores e regiões foi utilizado a elasticidade da função de produção de Leontief (função da matriz de Insumo-Produto) igual a um.

As elasticidades escolhidas⁵¹ nessa tese e calculadas em Viana (Relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES) utilizaram uma função de produção Translog com retorno constante a escala. Para os setores agrícolas foram ainda utilizadas elasticidades ponto a ponto da água bruta utilizada, isto é, o valor da elasticidade modifica pela quantidade de água bruta alocada no setor e região. Para os outros setores foram utilizadas elasticidades médias, isto é, o valor da elasticidade não modifica pela quantidade de água alocada no setor e região da economia. Os

⁵¹ Viana (relatório técnico do 1º ano do Projeto ANA-CAPES) calculou diversos tipos diferentes de elasticidades de produção para a água bruta para a água tratada. Estimou a função de produção de duas formas: Translog com Retorno Variáveis a Escala e Translog com Retorno Constantes a Escala. Calculou elasticidades médias para a área de estudo (o valor da elasticidade não depende da alocação de água bruta no setor e região) e elasticidades ponto a ponto (o valor da elasticidade depende da alocação da água bruta no setor e região).

valores das elasticidades por região e setor econômico estão no Apêndice C nas Tabela 26 e 27, esses valores foram apresentados por Viana na Terceira Reunião de Modeladores do Projeto ANA-CAPES.

Observe que toda a água tratada utilizada no setor e na região possui origem em alguma região. Assim:

$$\Delta AT_j^k = \sum_{q=1}^r \Delta AT_j^{q,k} \quad (33)$$

Onde:

- $\Delta AT_j^{q,k}$ é a variação da água tratada em valor monetário utilizado pelo setor j da região k com origem na região q .

A equação (33) afirma que a água tratada destinada ao setor j da região k é o somatório da água tratada com origem na região q e destinada ao setor j da região k .

Definimos o share da água tratada com origem na região q e com destino ao setor j da região k como:

$$S_{AT,j}^{q,k} = \frac{\Delta^q AT_j^k}{\Delta^q AT} \quad (34)$$

Onde:

- $\Delta^q AT_j^k$ é a variação da água tratada utilizada pelo setor j da região k com origem na região q ;
- $\Delta^q AT$ é a variação da água tratada total com origem na região q .

A equação (34) é o quantitativo normalizado da água tratada (total) com origem na região q que foi para o setor j da região k .

Observe que:

$$\sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n S_{AT,j}^{q,k} = \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^n \frac{\Delta^q AT_j^k}{\Delta^q AT} = \frac{\Delta^q AT}{\Delta^q AT} = 1$$

Observe também que:

$$\Delta AT_j^k = \sum_{q=1}^r \Delta AT_j^{q,k} = \sum_{q=1}^r s_{AT,j}^{q,k} * \Delta^q AT \quad (35)$$

Além disso, por definição temos que $\Delta^q AT = \Delta x_{AT}^q$.

Portanto substituindo (35) em (32) temos:

$$-\Delta x_j^k + \frac{1}{a_{AT,j}^k} * \varepsilon_{AT,j}^k * \sum_{q=1}^r s_{AT,j}^{q,k} * \Delta x_{AT}^q + \frac{1}{a_{AB,j}^k} * \varepsilon_{AB,j}^k * \Delta AB_j^k = 0 \quad (36)$$

A equação (36) vale para todo $k = 1, \dots, r$ e $j = 1, \dots, n$.

Juntando todas essas $r * n$ equações temos agora um sistema com $r * n$ equações e $2 * r * n$ variáveis, a saber, as variáveis são $\{\Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_n^r, \Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_n^r\}$. Observe que $\{\Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_n^r\}$ estão em valor monetário e $\{\Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_n^r\}$ estão em unidade física.

Podemos escrever (24) na forma matricial:

$$P\Delta X + N\Delta AB = 0 \quad (37)$$

Onde:

- P é uma matriz quadrada $r * n \times r * n$;
- N é uma matriz diagonal $r * n \times r * n$;
- ΔAB é o vetor coluna $\Delta AB = \begin{pmatrix} \Delta AB_1^1 \\ \Delta AB_2^1 \\ \vdots \\ \Delta AB_n^r \end{pmatrix}$;
- ΔX é o vetor coluna de produção total da matriz de Insumo-Produto $\Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x_1^1 \\ \Delta x_2^1 \\ \vdots \\ \Delta x_n^r \end{pmatrix}$.

A matriz P pode ser escrita como a soma da identidade com a matriz por blocos:

$$P = -I + (p^1 \quad \dots \quad p^r)$$

Onde cada matriz P^k pode ser descrito como:

$$P^k = \begin{pmatrix} 0 & \dots & \frac{1}{a_{AT,1}^1} * \varepsilon_{AT,1}^1 * S_{AT,1}^{k,1} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \frac{1}{a_{AT,2}^1} * \varepsilon_{AT,2}^1 * S_{AT,2}^{k,1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{a_{AT,n}^r} * \varepsilon_{AT,n}^r * S_{AT,n}^{k,r} & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

Isto é, P^k é uma matriz $r * n \times n$ formada por valores não negativos somente na coluna que representa o setor da água tratada (coluna 56). Para todo $k = 1, \dots, r$;

A matriz diagonal N pode ser escrita como:

$$N = \begin{pmatrix} \frac{1}{a_{AT,1}^1} * \varepsilon_{AB,1}^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{AB,2}^1} * \varepsilon_{AB,2}^1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{a_{AB,n}^r} * \varepsilon_{AB,n}^r \end{pmatrix}$$

Juntando as equações em (25) e (37) temos:

$$\begin{aligned} (I - A)\Delta X - \Delta Y &= 0 & (r * n \text{ equações}) \\ P\Delta X + N\Delta AB &= 0 & (r * n \text{ equações}) \end{aligned} \tag{38}$$

O sistema representado pelas matrizes em (38) possui $2 * r * n$ equações e $3 * r * n$ variáveis, a saber as variáveis são: $\{\Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_n^r, \Delta y_1^1, \Delta y_2^1, \dots, \Delta y_n^r, \Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_n^r\}$.

Se $\{\Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_n^r\}$ são as variáveis exógenas do modelo. Temos em (38) um sistema com o mesmo número equações e variáveis endógenas, supondo que esse sistema é não singular⁵² temos uma única solução para o sistema para cada conjunto de variáveis exógenas $\{\Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_n^r\}$.

⁵² Isto é, determinante do sistema (quando isolado as variáveis endógenas de um lado da igualdade e as constantes no outro lado da igualdade) é diferente de zero.

Definindo a matriz por blocos Q da seguinte forma:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 \\ N \end{pmatrix} \quad (39)$$

Podemos rescrever (26) na seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} (I - A) & -I \\ P & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} + Q \Delta AB = 0$$

Observe que as matrizes $I - A$, P , $-I$ e N são todas matrizes quadradas $r * n \times r * n$.

Definindo a matriz por blocos M na forma:

$$M = \begin{pmatrix} (I - A) & -I \\ P & 0 \end{pmatrix} \quad (40)$$

Rescrevemos (38) como:

$$M \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} = -Q \Delta AB$$

Consequentemente na forma matricial podemos escrever (38) como:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} = -M^{-1} Q \Delta AB \quad (41)$$

A equação (41) é a representação matricial⁵³ da metodologia proposta nessa tese de doutorado. Observe como essa equação representa a ligação entre a saída da modelagem de otimização da alocação do recurso hídrico, isto é, a variação de água bruta⁵⁴ em cada setor e região com a

⁵³ Essa metodologia envolve o cálculo com uma grande quantidade de matrizes, para o resultado dessa tese foi feito um esforço próprio de Ribeiro (autor da tese) e Dias (doutoranda em Planejamento Energético) para criar um software em Matlab para o cálculo matricial.

⁵⁴ Lembre-se que ΔAB é o vetor coluna da variação de água bruta em unidades física para cada setor j e região k ,

isto é, $\Delta AB = \begin{pmatrix} \Delta AB_1^1 \\ \Delta AB_2^1 \\ \vdots \\ \Delta AB_n^r \end{pmatrix}$.

matriz de Insumo-Produto, o resultado final é o vetor coluna da variação de produção total ΔX e o vetor coluna da variação da demanda final ΔY .

Para os dois cenários analisados utilizaremos o modelo de otimização do recurso hídrico que terá como resultado o valor de água bruta alocado em cada nó de demanda nas duas situações (sob as estratégias de gestão atuais no período de 2011 a 2013 e variando as mesmas). Os resultados do modelo de otimização, dado por essas variações em cada nó de demanda, serão agregados por setor econômico (da matriz de Insumo-Produto) e região (da matriz de Insumo-Produto) permitindo a conexão com a matriz de Insumo-Produto. Comparando a água bruta alocada inicialmente, temos a variação de água bruta por setor econômico e região, isto é, o vetor coluna ΔAB . Utilizando a modelagem proposta nessa seção obteremos pela equação (41) o resultado do novo vetor coluna de produção total ΔX e por (25) teremos um novo vetor de demanda final ΔY .

Existem muitas referências que consideram o recurso hídrico como fator primário na matriz de Insumo-Produto. Segundo Velasquez (2006) uma das primeiras modelagens desse tipo de ligação foi feita por Lofting e Mcgauhe (1968). A maior parte das referências considera recurso hídrico na modelagem de Insumo-Produto utilizando a extensão da MIP (formulada por Leontief, 1970), isto é, adicionado a linha água na matriz de Insumo-Produto como pode ser visto em Velasquez (2006), Alcántara e Padilla (2009) e Hubaceck (2010). A análise dos impactos econômicos em cenários diferentes de políticas de água em uma matriz de Insumo-Produto pode ser vista em Boudhar et al. (2017), Llop (2008) e Dietzenbacher e Velázquez (2007). Nesses artigos a análise se limita a encontrar os setores econômicos que mais utilizam o recurso hídrico. Outros estudos mostram a saída de um modelo de otimização de recursos hídricos integradas a matriz de Insumo-Produto, como em Bhatia (2006) e Jonkman et al. (2008).

Bhatia (2006) conectou modelos de otimização a uma matriz de Contabilidade Social e calculou o impacto indireto na economia do estado de Tamil Nadu, na Índia, de mecanismos de alocação de água mais flexíveis. Nesta referência foram considerados dois grupos de setores, um que utiliza o recurso hídrico na sua função de produção e os que não utilizam. Calculou-se o impacto indireto utilizando a equação (25), mas sem a variação do vetor de demanda final. A inovação da proposta metodológica dessa tese é o cálculo do impacto direto e indireto como definido na maior parte da literatura da modelagem de Insumo-Produto. Ademais, propõe-se o cálculo do novo vetor de demanda final tornando a equação (25) de volta ao equilíbrio da

economia. Outra inovação diz respeito à diferenciação da utilização da água bruta e água tratada e, finalmente, diferente de Bhatia (2006) calcularemos os impactos econômicos intrarregional e o efeito transbordamento.

Lucas (1976) critica que a formulação macroeconômica baseada em dados históricos e sem uma teoria econômica, isto é, puramente empírica, não pode ser utilizado para prever o resultado de mudanças na política econômica, sendo necessário um aprofundamento por parte do pesquisador para modelar os parâmetros importantes que podem mudar de acordo com o comportamento individual diante das mudanças. Por um lado - se nessa tese essa crítica pode ser aplicada aos parâmetros utilizados na modelagem de ligação, a saber: os coeficientes e elasticidades de água bruta e água tratada por região e setor econômico, que mantemos iguais a 2011 para o ano estudado de 2012. Por outro lado, espera-se que coeficientes e elasticidades não tenham se alterado, de fato, tanto. Isto porque tendo sido 2011 um ano úmido, com o atendimento de praticamente toda a demanda hídrica resultou em reservatórios próximos a capacidade máxima, no início de 2012. Isto fez com que, apesar da seca iniciada no ano, o mesmo contou com uma disponibilidade hídrica elevada não tendo submetido os agentes a situações muito diferenciadas do ano de 2011. Consequentemente por esses dois motivos acreditamos ser uma hipótese razoável que os usuários que utilizam a água bruta na região não tenham mudado a sua função de produção no ano de 2012.

O ideal, portanto, é que seja feita uma análise de sensibilidade nos valores de coeficientes técnicos e elasticidades para que se possa verificar a robustez dos resultados da ligação, diante de uma variação nos referidos parâmetros. Devido a limitações de tempo não foi feita neste estudo, mas consta como um dos pontos na continuidade dessa pesquisa.

4. DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são descritos os cenários utilizados e os resultados associados à integração entre os modelos de otimização e o de Insumo-produto desenvolvidos para a área de estudo. Serão usados um cenário referência, que simula a operação dos reservatórios e alocação de água entre os usuários efetivamente realizada para o ano de 2012 e um cenário alternativo, que simula uma mudança na gestão dos reservatórios e, portanto, uma modificação na alocação entre os usuários para o mesmo ano de 2012. Faremos, ainda, a discussão e a análise desses resultados em cada um desses cenários.

4.1 CENÁRIO REFERÊNCIA– SIMULAÇÃO DA ESTRATÉGIA UTILIZADA NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS E ALOCAÇÃO ENTRE OS USUÁRIOS EM 2012

O ano de 2012 foi um ano atípico em termos de quantitativos de precipitação no estado de Pernambuco com valores bastante inferiores às médias encontradas no período de 2011 a 2016. A Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) caracterizou o ano de 2012 como um ano de seca no estado, caracterizando-o ainda como um ano muito seco em algumas mesorregiões do estado (Silva et al., 2012). A Figura 41 mostra o desvio percentual da precipitação entre os anos de 2011 a 2014 em comparação à média registrada no mesmo período. Pode-se ver na Figura 41 que a queda percentual no ano de 2012 em relação à média chegou a mais de 80% em algumas regiões do estado. Na nossa área de estudo, que inclui o agreste e uma parte do litoral de Pernambuco, a queda em relação à média no ano de 2012 chegou a 70% no agreste e a 30% no litoral, de acordo com Asfora et al. (2017). Assim, no ano simulado, ocorreu significativa diminuição da oferta de água bruta superficial, devido à redução do volume de chuvas no ano de 2012, quando comparado ao ano de 2011.

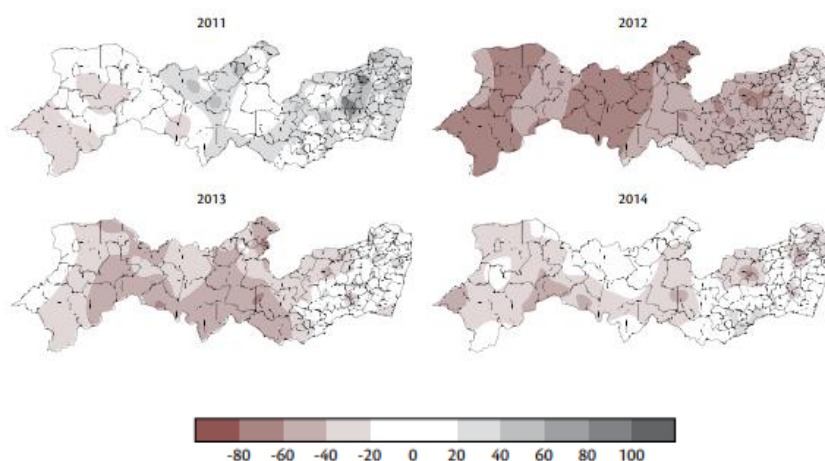


Figura 41: Desvio percentual em relação à média de precipitação entre os anos de 2011 a 2014. Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e Asfora et al. (2017).

A Figura 42 mostra o valor agregado⁵⁵ da disponibilidade hídrica considerando as bacias incrementais dos rios estudados: Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Em 2011 o total

⁵⁵ variação de produção em todas as regiões e setores econômicos.

agregado foi de 8.152 milhões de m³ e em 2012 foi de 2.288 milhões de m³, uma redução de 72%.

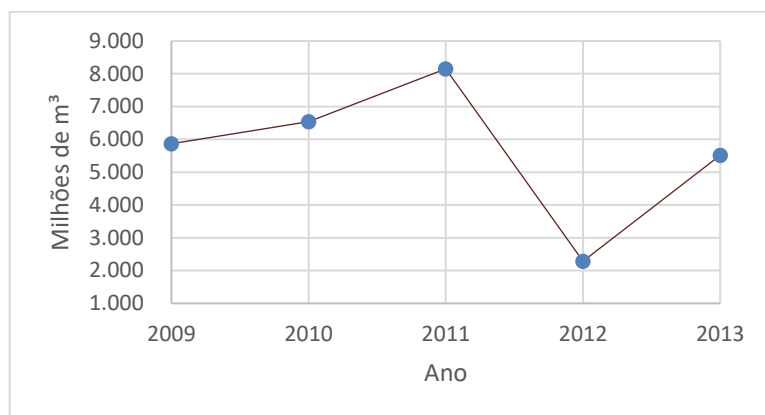


Figura 42: Oferta de água bruta proveniente da precipitação na área de estudo. Fonte: Plano Hidroambiental da bacia do Capibaribe (2010), Plano Hidroambiental da bacia do Ipojuca (2010), Heal System e elaboração própria do autor.

Existem dezesseis nós do tipo reservatório na rede de nós e links simplificada e que são utilizadas neste estudo (seção 3.3). A Figura 43 mostra o volume total desses reservatórios no início de cada ano, no período de 2010 a 2014, podendo-se observar nos anos de 2010 e 2011 volumes iniciais próximos à capacidade máxima de acumulação. Observa-se então a grande redução (34%) na acumulação no início de 2013, atestando ter sido o ano de 2012 muito escasso em chuvas, o que levou, dada a pouca oferta hidrológica, a um uso intensivo das reservas acumuladas durante todo o ano de 2012 para atender as demandas por água bruta.

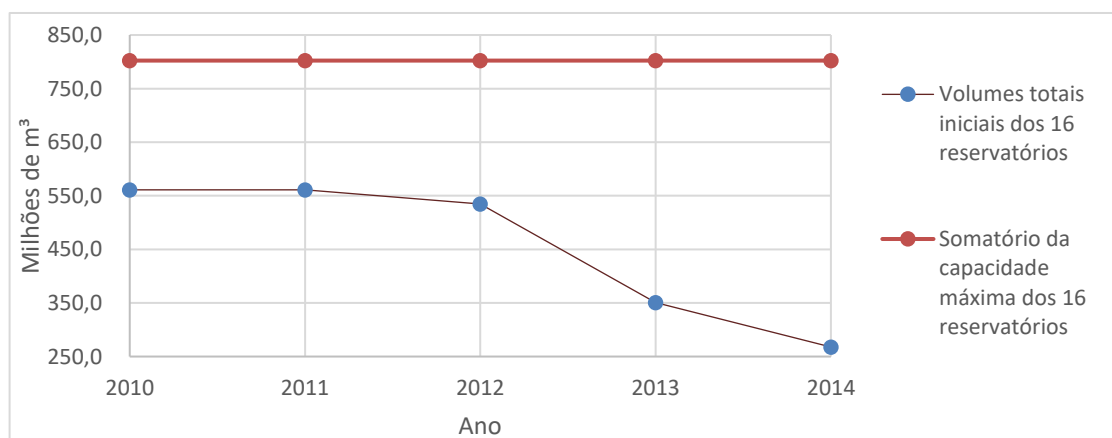


Figura 43: Volumes totais iniciais dos 16 reservatórios modelados na rede de nós e links simplificada. Fonte: Elaboração própria do autor utilizando informações da APAC.

Para o cenário referência utilizamos a modelagem de otimização baseada na rede de nós e links simplificada, descrita na seção 3.3. Foram colocadas restrições adicionais em relação às descritas na referida seção, de forma a simular as condições de operação ocorridas nos reservatórios no ano estudado (2012), a saber: os níveis dos reservatórios foram requeridos ser iguais aos níveis reais observados no início e final do ano de 2012, além da inclusão de uma restrição que prioriza o abastecimento humano (tipo de uso água e esgoto).

A Figura 44 apresenta de forma agregada o resultado do modelo de otimização que aloca os recursos hídricos entre os diversos usuários demandantes no cenário referência, mostrando a demanda total atendida e a não atendida em cada uma das quatro bacias. Observa-se que, mesmo tendo sido um ano escasso em chuvas, dadas as reservas acumuladas nos reservatórios, pôde-se atender a maior parte das demandas nas quatro bacias. Há redução apenas ao atendimento de demandas nas bacias do Capibaribe e Sirinhaém, que sofrem redução no atendimento de 4,4% e 4,8% do total demandado respectivamente enquanto as bacias do Ipojuca e Una não sofrem alteração.

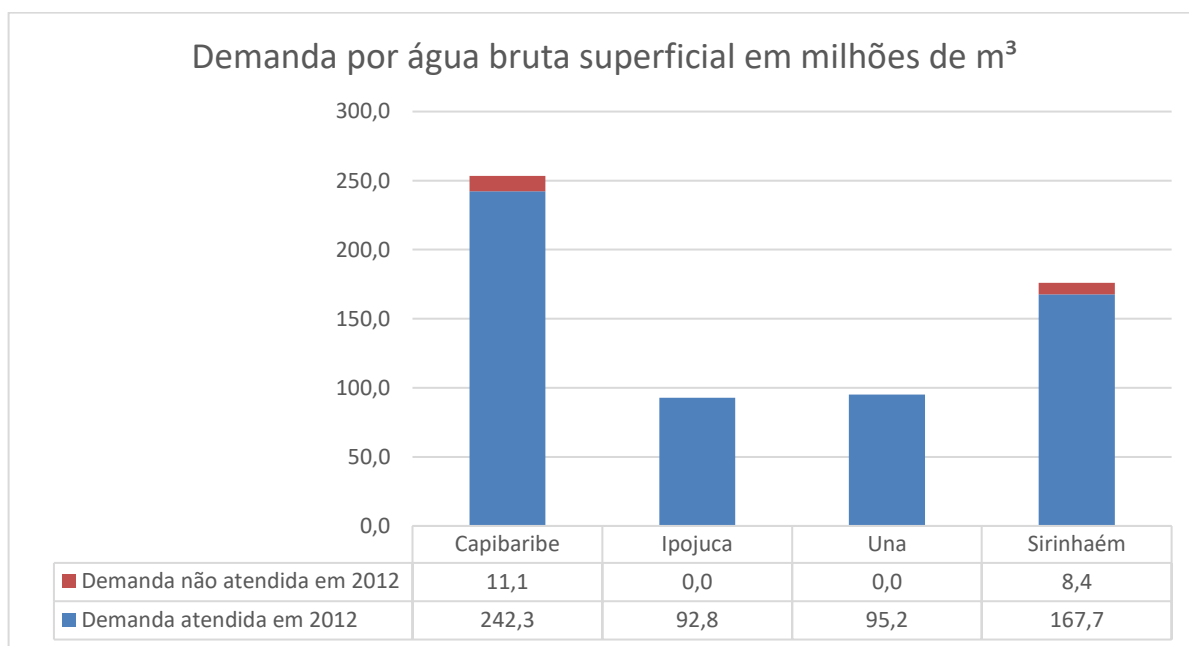


Figura 44: Demanda atendida e não atendida em 2012 no cenário referência nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Fonte: Elaboração própria do autor.

A solução do modelo fornece, de forma detalhada, a alocação da água no cenário referência em cada um dos 273 nós de demanda da rede de nós e links simplificada. Utilizando essa informação e o valor requerido em cada nó de demanda, pode-se calcular se houve ou não variação no atendimento da água bruta em cada um dos nós de demanda da rede. Como cada nó de demanda está associado a um único setor econômico e uma única região da matriz de

Insumo-Produto, pode-se, ao fazer a agregação, encontrar as variações de água bruta por setor e região da matriz de Insumo-Produto, isto é, obtemos o vetor ΔAB (da seção 3.6) no cenário referência para o ano de 2012.

A Tabela 6 mostra o resultado da alocação dada pelo modelo de otimização agregada pelas regiões e setores econômicos em que a demanda por água bruta não foi totalmente atendida no cenário referência. Ao todo são vinte e sete nós de demanda que são afetados no cenário, o que corresponde a 9,8% do total de nós de demanda. O setor da economia que tem a maior redução em valor absoluto (em milhões de m³) foi o cultivo da cana de açúcar com o não atendimento de 18,9 milhões de m³.

Tabela 6: Demanda requerida total, vazão alocada, demanda não atendida e percentual não atendido de água bruta por setor econômico e região⁵⁶ da matriz de Insumo-Produto no cenário no ano de 2012. Fonte: Elaboração própria do autor.

Região	Setor Econômico	Demanda requerida (em milhões de m ³)	Demanda alocada (em milhões de m ³)	Redução no atendimento da água bruta (ΔAB) (em milhões de m ³)	% não atendido	Bacia	Nó de oferta
Total		73,69	54,26	19,43	26,4%		
PAUDALHO	Cultivo de cana-de-açúcar	14,55	3,49	11,05	76,0%	Capibaribe	Açude Cursai
RIBEIRÃO	Cultivo de cana-de-açúcar	27,10	20,09	7,01	25,9%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
SIRINHAÉM	Cultivo de cana-de-açúcar	11,39	10,94	0,45	3,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
JOAQUIM NABUCO	Cultivo de cana-de-açúcar	1,16	0,94	0,22	18,8%	Sirinhaém	Stream12809
BARRA DE GUABIRABA	Outros da fruticultura	0,81	0,68	0,13	15,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de cana-de-açúcar	0,64	0,52	0,12	18,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,28	0,22	0,06	23,1%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SIRINHAÉM	Transporte terrestre	0,43	0,37	0,06	14,4%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,32	0,27	0,05	16,7%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Outros da fruticultura	0,15	0,10	0,05	33,0%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
CORTÊS	Cultivo de cana-de-açúcar	15,62	15,58	0,05	0,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BONITO	Cultivo de plantas de lavoura não	0,12	0,08	0,04	31,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém

⁵⁶ Regiões e setores econômicos em que a demanda por água bruta não foi totalmente atendida no cenário referência.

	especificadas anteriormente						
CORTÊS	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,13	0,09	0,03	26,1%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de milho	0,10	0,07	0,02	24,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Construção	0,11	0,09	0,02	20,0%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
BONITO	Cultivo de milho	0,11	0,09	0,01	11,7%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Cultivo de milho	0,04	0,03	0,01	24,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SAIRÉ	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,50	0,49	0,01	1,7%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
GRAVATÁ	Outros da fruticultura	0,05	0,04	0,01	17,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,02	0,02	0,01	23,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Outros da fruticultura	0,015	0,011	0,004	25,4%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,015	0,012	0,003	22,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SAIRÉ	Cultivo de milho	0,005	0,003	0,002	38,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,003	0,001	0,002	52,2%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
GAMELEIRA	Construção	0,016	0,014	0,001	8,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SAIRÉ	Outros da fruticultura	0,005	0,004	0,001	25,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Cultivo de milho	0,004	0,003	0,001	30,2%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Pecuária	0,010	0,009	0,001	8,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém

4.1.1 Ligação com a modelagem de Insumo-Produto

Para o cenário referência⁵⁷ o sistema de equações em (38) da seção 3.6 possui $2 * 75 * 76 = 11.400$ equações e $3 * 75 * 76 = 17.100$ variáveis⁵⁸, assim, para encontrarmos uma solução precisamos definir quais variáveis são exógenas e endógenas ao modelo. Para isso, utilizaremos duas hipóteses de modelagem: a primeira é que as regiões e setores econômicos que tiveram

⁵⁷ Nesse cenário são 75 diferentes regiões e 76 diferentes setores econômicos.

⁵⁸ A saber, as variáveis são para cada região e setor econômico: a variação da alocação da água bruta, a variação do valor da demanda final e da variação do valor da produção, isto é, $\{\Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_{76}^{75}, \Delta y_1^1, \Delta y_2^1, \dots, \Delta y_{76}^{75}, \Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_{76}^{75}\}$.

variação da alocação da água bruta (isto é, $\Delta AB_s^r \neq 0$) na solução do modelo de alocação de água são variáveis exógenas ao modelo (ou seja, as variações provenientes do modelo de alocação de água são respeitadas), a segunda é que nas outras regiões e setores econômicos não ocorre variação da demanda final (isto é, $\Delta y_j^k = 0$) e, conseqüentemente, essas variáveis também são exógenas. Todas as outras variáveis são endógenas, assim temos um sistema com 11.400 equações e o mesmo número de variáveis endógenas e, portanto, podemos calcular uma solução.

Deve-se observar que temos dois vetores da variação da alocação de água bruta (ΔAB) diferentes, o primeiro é a solução do modelo de alocação de água⁵⁹ visto na seção 3.4 e o segundo é a solução do sistema de equações em (38) descrita no parágrafo anterior. Os elementos desses dois vetores são iguais nas regiões e setores econômicos em que ocorre efetivamente uma variação da alocação de água (isto é, $\Delta AB_s^r \neq 0$) na solução do modelo de otimização, mas pode diferir nos outros elementos. A diferença se explica devido ao modelo de alocação de água não observar as variações de produção das regiões e setores econômicos. Por exemplo, se ocorrer a queda na demanda de um bem que utiliza a água como insumo e, conseqüentemente ocorrer uma queda na produção desse bem, implicará em uma redução na quantidade de água, a ser utilizada para a produção do bem desse setor econômico. Este efeito, no entanto, não é resultante de diferentes estratégias de alocação associados à disponibilidade hídrica ou à operação de reservatórios e, portanto, não é capturado na modelagem de otimização baseada na rede de nós e links, mas aparece na modelagem de Insumo-Produto.

Como a solução do modelo de 11.400 equações e incógnitas fazemos a ligação do modelo de Insumo-Produto e modelo de alocação de água, pode-se obter tal efeito através dessa ligação, e dessa forma refinando-se a solução encontrada no modelo de alocação de águas.

Além disso, deve-se observar ainda que, dos 88 municípios considerados no modelo de Insumo-Produto (ver Tabela 21 do Apêndice A), 49 deles possuem algum percentual fora da região hidrográfica das quatro bacias analisadas no modelo de alocação de água. Isto significa que nem todas as suas demandas de água são atendidas pelas referidas bacias. Ademais, o Modelo de Insumo-Produto ainda considera mais quatro regiões fora da área de estudo, a saber: Resto de Pernambuco, Bahia, Resto do Nordeste e Resto do Brasil. As demandas de usuários nestas regiões não são incluídas no modelo de alocação de água, pois não são abastecidas pelas águas

⁵⁹ Com os valores agregados por regiões e setores econômicos da matriz de Insumo-Produto.

das bacias interligadas. Assim, variações na alocação de águas, não observadas no modelo da seção 3.4, podem ser parcialmente mensuradas na solução das equações em (38).

A Tabela 7 mostra os valores da variação da água bruta como solução do modelo de alocação de água (ΔAB) e da solução da integração entre as modelagens ($\Delta AB'$) em cada uma das regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias. A soma da diferença entre as duas soluções em valor absoluto nas regiões que tem ao menos algum percentual nas quatro bacias interligadas (em todas as regiões e setores econômicos), isto é, $\sum_r \sum_s |\Delta AB_s^r - \Delta AB_s'^r| = 6,8$ mil m³ (coluna 4 da Tabela 7), esse valor equivale a 0,03% quando comparado a variação de alocação de água encontrada na solução do modelo de alocação de água (que resultou numa redução total de 19,43 milhões de m³ como visto na coluna 2 da Tabela 7), e equivale a 0,00004% do total da água bruta demandada na região das quatro bacias. Consequentemente, podemos dizer que as duas soluções são suficientemente próximas.

Tabela 7: Variação de água bruta resultante da solução do modelo de alocação de água e resultante da solução da integração entre as modelagens em cada uma das 71 regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias.

Regiões	ΔAB - Solução do modelo de alocação de água (redução da água bruta em m ³)	$\Delta AB'$ - Solução da integração entre as modelagens (redução da água bruta em m ³)	Diferença em valor absoluto (em m ³)
Total	19.427.036	19.433.931	6.895
Agregado Jucazinho	0	0	0
Agregado Bitury	0	8	8
Agregado Caetés/Capoeiras	0	0	0
Agrestina	0	0	0
Água Preta	0	165	165
Altinho	0	0	0
Amaraji	0	17	17
Arcoverde	0	2	2
Barra de Guabiraba	335.946	335.946	0
Barreiros	0	30	30
Belem de Maria	0	0	0
Belo Jardim	0	1	1
Bezerras	0	66	66
Bonito	51.396	51.402	6
Brejo da Madre de Deus	0	0	0
Calcado	0	0	0
Camaragibe	0	0	0
Camocim de São Felix	14.876	14.876	0
Canhotinho	0	0	0
Carpina	0	255	255

Caruaru	0	7	7
Catende	0	0	0
Cha de Alegria	0	276	276
Cha Grande	0	2	2
Cortes	81.062	81.116	54
Cupira	0	0	0
Escada	0	313	313
Feira Nova	0	0	0
Gameleira	1.332	2.444	1.112
Gloria do Goitá	0	0	0
Gravata	8.079	8.079	0
Ibirajuba	0	0	0
Ipojuca	0	959	959
Jaqueira	0	209	209
Jataúba	0	0	0
Joaquim Nabuco	216.782	216.801	19
Jucati	0	0	0
Jupi	0	0	0
Jurema	0	0	0
Lagoa do Carro	0	20	20
Lagoa do Itaenga	0	203	203
Lagoa dos Gatos	0	85	85
Lajedo	0	0	0
Limoeiro	0	31	31
Maraial	0	108	108
Moreno	0	7	7
Palmares	0	8	8
Panelas	0	0	0
Paudalho	11.054.041	11.054.902	861
Poção	0	0	0
Pombos	0	4	4
Primavera	0	1	1
Quipapá	0	0	0
Recife	0	1	1
Ribeirão	7.133.436	7.134.719	1.283
Rio Formoso	0	1	1
Saire	11.718	11.739	21
Santa Cruz do Capibaribe	0	0	0
São Benedito do Sul	0	0	0
São Caitano	0	0	0
São Joaquim do Monte	10.256	10.256	0
São Jose da Coroa Grande	0	0	0
São Lourenço da Mata	0	4	4
Sirinhaem	508.112	508.182	70
Tamandaré	0	203	203
Taquaritinga do Norte	0	0	0
Toritama	0	1	1

Tracunhaém	0	324	324
Venturosa	0	0	0
Vitoria de Santo Antão	0	7	7
Xexéu	0	152	152

A partir da solução do sistema de equações visto em (38) da seção 3.6 temos a variação no vetor de produção total (ΔX) e no vetor de demanda final (ΔY). Através deles faz-se a mensuração dos impactos econômicos diretos e indiretos como também dos impactos intrarregionais além do efeito transbordamento.

A matriz de Insumo-Produto utilizada nessa tese possui como base o ano de 2011. Como já ilustrado nas Figura 41 e Figura 42, este ano caracterizou-se por uma oferta hídrica elevada, superior aos anos anteriores e posteriores. Observou-se, ainda, a pouca utilização dos volumes armazenados nos reservatórios nas quatro bacias interligadas (ver Figura 43) durante o ano, sugerindo que toda a demanda requerida por água bruta deve ter sido atendida no período. Por isso, foi considerada a demanda requerida por água bruta levantada junto aos órgãos de regulação (conforme explicado na seção 3.2) como a água bruta efetivamente utilizada na economia e representada na linha de fator primário da matriz de Insumo-Produto. Para o ano de 2012, a estrutura econômica representada pelas proporções dos fatores de produção na matriz de Insumo-Produto, foi considerada a mesma.

4.1.2 Análise de resultados do cenário referência.

Na Tabela 8 pode-se ver os resultados da redução do atendimento das demandas no cenário referência expressos através da variação do valor da produção, do número de empregos e do PIB e dividido em impacto direto e impacto indireto⁶⁰ no ano de 2012, usando a integração do modelo de otimização com a MIP de 2011 proposta neste estudo. Se considerarmos a macrorregião das quatro bacias de forma conjunta as reduções no atendimento das demandas produziram impacto negativo no valor da produção de 7,62 milhões de reais uma perda de 170 postos de trabalho e uma redução do PIB de 5,58 milhões de reais.

⁶⁰ O impacto direto para cada região (r) e setor econômico (s) é a variação do valor da produção (Δx_s^r) da região e setor econômico que foi utilizada como fator de produção para atender a variação da demanda final, isto é, a linha $r * s$ da matriz $(I + A) \Delta Y$. O impacto indireto para cada região (r) e setor econômico (s) é a variação do valor da produção (Δx_s^r) que foi utilizado como insumo para atender a variação dos fatores de produção, os insumos dos insumos, etc..., isto é, a linha $r * s$ da matriz $\Delta X - (I + A) \Delta Y$.

Como pode-se observar na Tabela 8, o impacto indireto na macrorregião das quatro bacias representa apenas uma pequena parcela (1,1%) do impacto total na região neste cenário.

Para explicar esse impacto iremos analisar em mais detalhes o que ocorreu com a produção do setor econômico do “cultivo da cana-de-açúcar”. Como pode-se ver na Tabela 6, em seis regiões (a saber, Paudalho, Ribeirão, Sirinhaém, Barra de Guabiraba, Joaquim Nabuco e Cortês) o “cultivo da cana-de-açúcar” sofreu redução significativa de água bruta (18,9 milhões de m³, o que representa 97,2% do total da redução de água bruta na macrorregião das quatro bacias), consequentemente o valor agregado da redução da produção nesse setor econômico nas seis regiões foi responsável por 83,5% (6.371,7 mil reais) do impacto total na macrorregião das quatro bacias. Além disso, pode ser visto através da matriz de Insumo-Produto que nessas seis regiões os setores econômicos que mais utilizaram o produto desse setor (a cana-de-açúcar) como insumo foram: “fabricação e refino de açúcar”, “fabricação de álcool”, “alimentação” e “fabricação de bebidas não alcoólicas”. Por sua vez, esses setores econômicos sofreram pouca redução de água⁶¹ o que implica pela equação (36) da seção 3.6 que tiveram pouca redução no valor da produção⁶², o que resultou na manutenção dos valores demandados pelo insumo da cana-de-açúcar no cenário. Assim, para levar a economia novamente ao equilíbrio na MIP, ocorre a redução da demanda final pelo bem (o que pode ser visto pela equação 25 da seção 3.6). Dessa forma, os valores de produção total e demanda final no setor econômico do “cultivo de cana” e das 6 regiões se aproximam. De fato, o valor agregado da redução na demanda final é igual a 99,7% (6.354,9 mil reais) do valor agregado da redução da produção.

A variação do valor de demanda final é uma parcela do impacto direto (isto é, o valor agregado do impacto direto nesse setor econômico e nessas 6 regiões é maior em valor absoluto ou igual a 6.354,9 mil reais) e sabemos ainda que o impacto direto mais o impacto indireto iguala a variação da produção, consequentemente o impacto indireto é menor ou igual a 0,3% do valor da produção (de fato é igual a 12,7 mil reais, o que representa 0,2% do valor da produção). Portanto, para esse setor econômico e essas regiões o impacto indireto é igual a 0,2% do impacto

⁶¹ Somatório em valor absoluto em todas as regiões que fazem parte da macrorregião das quatro bacias e nos setores econômicos: “fabricação e refino de açúcar”, “fabricação de álcool”, “alimentação” e “fabricação de bebidas não alcoólicas” é igual a -1,5 mil m³, isto é, 0,007% do total da redução da água bruta em todas as regiões e setores econômicos.

⁶² De fato, o somatório da redução no cenário em valor da produção nesses setores econômicos em todas as regiões foi de 12,8 mil reais, isto é, 0,2% do total da variação de produção em todas as regiões e setores econômicos (coluna 6 da Tabela 6).

total e o impacto direto é igual a 99,8% do impacto total. A mesma lógica pode ser utilizada para analisar em mais detalhes a variação de produção no setor de “cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente” (responsável por 2,4% do impacto total) e do setor “outros da fruticultura” (responsável por 2,3% do impacto total).

O modelo de alocação de água visto na seção 3.4 não considera as regiões e setores econômicos fora da macrorregião das quatro bacias e, conseqüentemente, não ocorre variação de água nessas regiões e setores econômicos, o que implica pela segunda hipótese de modelagem visto na seção 4.1.1 que a demanda final por região e setor econômico fora da macrorregião das quatro bacias é igual a zero ($\Delta y_j^k = 0$). Assim, as variações de demanda final ocorrerão somente na macrorregião das quatro bacias e, conseqüentemente, as variações do valor da produção (coluna 2 da Tabela 8) ocorrerão pelo impacto intrarregional. E nas regiões do resto de Pernambuco (coluna 3 da Tabela 8), resto do Nordeste (coluna 4 da Tabela 8) e resto do Brasil (coluna 5 da Tabela 8) os impactos ocorrerão pelo efeito transbordamento. Comparando os valores do impacto intrarregional (coluna 2 da Tabela 8) com o impacto em todas as regiões (coluna 6 da Tabela 8), vemos que 21,8% do impacto total ocorre pelo efeito transbordamento (sendo 15,9% na região do resto do Brasil, 4,2% na região e 1,6% na região do resto de Pernambuco).

Comparando as colunas 3 e 5 da Tabela 8, vemos que o efeito transbordamento na região do resto do Brasil é dez vezes maior do que na região do resto de Pernambuco e quase quatro vezes maior do que na região do resto do Nordeste. Para analisarmos o motivo dessa diferença, novamente será analisado em mais detalhes o setor do “cultivo da cana-de-açúcar” nas mesmas seis regiões (a saber, Paudalho, Ribeirão, Sirinhaém, Barra de Guabiraba, Joaquim Nabuco e Cortês). Estas são responsáveis de forma agregada por 83,5% (6.371,7 mil reais) do impacto total no valor da produção na macrorregião das quatro bacias, devido a nova alocação de águas no cenário.

A diminuição da produção nesse setor e regiões acarreta numa diminuição da utilização dos seus insumos, ou seja, diminui-se a demanda por esses insumos dos setores que o produzem. Para a economia retornar ao equilíbrio temos que esses setores que fornecem os insumos para o cultivo da cana-de-açúcar diminuam a sua produção (ver a linha correspondente na equação 25 da seção 3.6). Observando-se a matriz de Insumo-Produto numa das regiões (Paudalho), o setor econômico “cultivo da cana-de-açúcar” utiliza insumos vindos da região resto do Brasil (66%), macrorregião das quatro bacias (18%), resto do Nordeste (13%) e resto de Pernambuco

(3%). Já na região de Ribeirão, o mesmo setor econômico (cultivo da cana-de-açúcar) utiliza insumos da região resto do Brasil (66%), macrorregião das quatro bacias (20%), resto do Nordeste (12%) e resto de Pernambuco (2%). Valores semelhantes são registrados no mesmo setor econômico (cultivo da cana-de-açúcar) nas regiões de Sirinhaém, Barra de Guabiraba, Joaquim Nabuco e Cortês. Portanto, o valor agregado da diminuição do valor da produção (em valor absoluto) nos setores econômicos que servem como insumo para o cultivo da cana-de-açúcar (isto é, parte do impacto direto e indireto observado na linha 2 da Tabela 6) é maior na região do resto do Brasil (coluna 5 da Tabela 8) do que na região do resto do Nordeste (coluna 4 da Tabela 8) que, por sua vez, é maior que a região do resto de Pernambuco (coluna 3 da Tabela 8).

Tabela 8: Impactos no valor da produção em milhares de reais, no número de empregos em postos de trabalho e no valor do PIB em milhares de reais no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.

Cenário referência	Macrorregião das quatro bacias	Resto de Pernambuco	Resto do Nordeste	Resto do Brasil	Brasil	Efeitos do impacto
Δ do valor da produção (em milhares de reais)	-7.629,8	-155,2	-416,4	-1.553,5	-9.754,9	Impacto direto e indireto
	-7.544,2	-117,7	-220,9	-665,0	-8.547,7	Impacto direto
	-85,6	-37,5	-195,7	-888,5	-1.207,2	Impacto indireto
Δ do emprego (em número de postos de trabalho)	-171	-1	-2	-4	-178	Impacto direto e indireto
	-169	-1	-1	-1	-173	Impacto direto
	-1	0	-1	-3	-5	Impacto indireto
Δ do PIB (em milhares de reais)	-5.579,5	-71,5	-110,0	-489,2	-6.250,1	Impacto direto e indireto
	-5.531,7	-53,4	-40,7	-129,4	-5.755,3	Impacto direto
	-47,9	-18,1	-69,3	-359,7	-494,8	Impacto indireto

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA⁶³

Com a matriz de Insumo-Produto utilizada nesse estudo foi possível calcular os valores da produção, número de postos de trabalho e PIB para as macrorregiões estudadas. A Tabela 9 abaixo compara os valores dos impactos encontrados no cenário referência com os valores totais por macrorregião. Como podemos ver o impacto dos indicadores sociais e econômicos em termos relativos não são significativos, sendo que são maiores na macrorregião das quatro bacias. No cenário referência parte do impacto negativo social e econômico decorrente da seca

⁶³ Originalmente os valores monetários são para o ano base da matriz de Insumo-Produto, isto é, 2011. Atualizamos esses valores para 2019 utilizando o IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) que é medido mensalmente pelo IBGE.

Fonte: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPublico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>.

foi absorvido pela utilização da água bruta dos reservatórios. Na próxima seção trataremos sobre o cenário alternativo que tem uma utilização mais conservadora da água dos reservatórios, e nele como veremos os impactos em termos relativos nesse cenário serão maiores.

Tabela 9: Variação nos indicadores sociais e econômicos do cenário referência, valor observado na matriz de Insumo-Produto e variação percentual. Fonte: Elaboração própria do autor.

	Macrorregião das quatro bacias	Resto de Pernambuco	Resto do Nordeste	Resto do Brasil	Brasil	Indicador social e econômico
Δ do impacto no cenário referência	-7.629,8	-155,2	-416,4	-1.553,5	-9.754,9	Valor da produção (em milhares de reais)
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	168.127.778	92.505.947	1.209.906.916	10.208.580.931	11.679.121.575	
Δ %	-0,00454%	-0,00017%	-0,00003%	-0,00002%	-0,00008%	
Δ do impacto no cenário referência	-170	-1	-2	-4	-178	Número de postos de trabalho
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	2.011.522	1.233.352	16.884.836	79.432.087	99.561.796	
Δ %	-0,00843%	-0,00010%	-0,00001%	-0,00001%	-0,00018%	
Δ do impacto no cenário referência	-5.579,5	-71,5	-110,0	-489,2	-6.250,1	PIB (em milhares de reais)
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	96.854.460	50.295.708	655.211.990	5.037.870.769	5.840.232.928	
Δ %	-0,00576%	-0,00014%	-0,00002%	-0,00001%	-0,00011%	

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

Como podemos ver, para a macrorregião das quatro bacias ocorreu a redução de 1 posto de trabalho como consequência do impacto indireto o que equivale a 0,6% do impacto total, além disso ocorreu a redução de sete postos de trabalho pelo efeito transbordamento nas regiões do resto de Pernambuco (redução de um posto de trabalho), resto do Nordeste (redução de dois postos de trabalho) e resto do Brasil (redução de três postos de trabalho) o que equivale a 3,9% do impacto total em todo o território nacional. Ocorre, ainda, a redução de 5,5 milhões de reais no valor do PIB na macrorregião das quatro bacias o que equivale a 89,3% do impacto total, além disso, ocorre a redução de 670,6 mil reais pelo efeito transbordamento nas regiões do resto de Pernambuco (redução de 71,5 mil reais), resto do Nordeste (redução de 110 mil reais) e resto do Brasil (redução de 489,2 mil reais) o que equivale a 10,7% do impacto total em todo o território nacional. A variação do número de postos de trabalho e valor do PIB são calculados para cada região e setor econômico a partir da variação do valor da produção (multiplicados pelos respectivos coeficientes da matriz de Insumo-Produto), consequentemente, a mesma análise realizada até aqui nessa seção pode ser utilizada para explicar a diferença do impacto

direto e indireto, além da diferença entre as regiões no efeito transbordamento, no número de postos de trabalho e valor do PIB.

Na Tabela 10 são apresentadas todas as regiões que compõem a “macrorregião das quatro bacias” e que tiveram variação dos indicadores econômicos no cenário referência. As regiões com maiores reduções nos indicadores econômicos são: Ribeirão, Paudalho, Sirinhaém e Barra de Guabiraba. Como era de se esperar e pode ser visto na Tabela 7, essas também são as regiões com as maiores variações de alocação de água bruta. Ainda nessas regiões as maiores variações do valor da produção ocorreram no setor do cultivo da cana-de-açúcar⁶⁴ e como já foi dito anteriormente o impacto indireto nesse setor e nessas regiões representam uma pequena parcela do impacto total.

Como pode ser visto na Tabela 10, é em Recife que ocorre a maior variação (em termos absolutos) do impacto indireto na macrorregião das quatro bacias. Os setores econômicos em que essas maiores variações (do impacto indireto em termos absolutos) ocorrem são: “outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares” onde ocorre a redução de 14,5 mil reais do valor da produção pelo impacto indireto, “intermediação financeira, seguros e previdência complementar” onde ocorre a redução de 6,4 mil reais e o “comércio atacadista” onde ocorre a redução de 5,5 mil reais. Não ocorre redução de alocação de água bruta nessa região, consequentemente pela escolha das variáveis exógenas a variação agregada na demanda final é igual a zero. Por outro lado, pela ligação intersetorial alguns setores econômicos dessa região produzem os insumos para outras regiões como são os casos dos setores “transporte terrestre”, “comércio atacadista” e “distribuição de energia elétrica”.

⁶⁴ O setor econômico do cultivo da cana-de-açúcar foi responsável por 82,7% da variação do valor da produção em Ribeirão, 99,2% da variação do valor da produção em Paudalho, 95,1% da variação do valor da produção em Sirinhaém, 93,9% da variação do valor da produção em Barra de Guabiraba,

Tabela 10: Regiões da macrorregião das quatro bacias⁶⁵ no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.

	Δ do valor da produção em milhares de reais			Δ do emprego em número de postos de trabalho			Δ do PIB em milhares de reais		
Regiões	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto
Ribeirão	-3.141,3	-3.136,9	-4,4	-71	-71	0	-2.262,1	-2.260,2	-1,9
Paudalho	-2.718,9	-2.717,2	-1,6	-53	-53	0	-2.069,8	-2.068,9	-0,9
Sirinhaem	-724,0	-723,2	-0,8	-14	-14	0	-542,3	-541,8	-0,5
Barra de Guabiraba	-316,2	-316,2	0,0	-7	-7	0	-240,8	-240,8	0,0
Camocim de São Felix	-174,2	-174,1	-0,2	-11	-11	0	-112,5	-112,3	-0,2
Recife	-171,1	-118,3	-52,8	-2	-1	-1	-96,1	-65,2	-30,9
Saire	-81,4	-81,2	0,0	-2	-2	0	-55,1	-55,1	0,0
Joaquim Nabuco	-76,0	-76,0	0,0	-1	-1	0	-58,0	-58,0	0,0
Ipojuca	-65,2	-53,7	-11,5	0	0	0	-39,4	-33,6	-6,0
São Joaquim do Monte	-31,3	-31,3	0,0	-2	-2	0	-22,6	-22,6	0,0
Gravata	-25,3	-24,8	-0,5	0	0	0	-16,3	-16,2	-0,3
Cortes	-22,1	-22,0	0,0	-2	-2	0	-17,1	-17,1	0,0
Bonito	-20,6	-20,4	0,0	-3	-3	0	-16,0	-16,0	0,0
Caruaru	-17,0	-12,1	-4,9	0	0	0	-9,7	-6,8	-3,0
Gameleira	-6,8	-6,8	0,0	0	0	0	-3,3	-3,3	0,0
Vitoria de Santo Antão	-5,0	-3,8	-1,3	0	0	0	-2,2	-1,6	-0,6
São Lourenço da Mata	-4,1	-3,5	-0,6	0	0	0	-1,7	-1,4	-0,3
Carpina	-3,8	-2,7	-0,9	0	0	0	-1,6	-1,1	-0,5
Belo Jardim	-3,1	-2,2	-0,9	0	0	0	-1,1	-0,8	-0,3
Bezerras	-2,4	-1,6	-0,8	0	0	0	-1,4	-0,9	-0,5
Moreno	-2,2	-1,7	-0,5	0	0	0	-0,9	-0,8	-0,3
Agregado Bitury	-1,6	-1,3	-0,3	0	0	0	-0,8	-0,6	-0,2
Camaragibe	-1,4	-1,1	-0,3	0	0	0	-0,6	-0,5	-0,2
Arcoverde	-1,3	-0,9	-0,3	0	0	0	-0,6	-0,5	-0,2
Agregado Jucazinho	-1,3	-0,9	-0,3	0	0	0	-0,6	-0,5	-0,2
Escada	-1,3	-0,9	-0,3	0	0	0	-0,5	-0,5	-0,2
Palmares	-1,1	-0,8	-0,2	0	0	0	-0,6	-0,5	-0,2
Santa Cruz do Capibaribe	-0,9	-0,6	-0,3	0	0	0	-0,6	-0,5	-0,2
Limoeiro	-0,6	-0,6	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,3	0,0
Pombos	-0,6	-0,6	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,3	0,0
Cha Grande	-0,6	-0,5	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,3	0,0
Lajedo	-0,6	-0,5	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,2	0,0
Barreiros	-0,6	-0,5	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,2	0,0
Lagoa do Itaenga	-0,6	-0,5	-0,2	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Rio Formoso	-0,6	-0,5	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,2	0,0
Toritama	-0,5	-0,3	-0,2	0	0	0	-0,3	-0,3	-0,2
Água Preta	-0,3	-0,3	0,0	0	0	0	-0,3	-0,3	0,0

⁶⁵ Regiões em que ocorreram variação nos indicadores econômicos no cenário referência.

Cha de Alegria	-0,3	-0,3	0,0	0	0	0	-0,3	-0,2	0,0
São Caetano	-0,3	-0,3	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Primavera	-0,3	-0,3	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Catende	-0,3	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Gloria do Goitá	-0,3	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Taquaritinga do Norte	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	0,0	0,0
Tamandaré	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Lagoa do Carro	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Amaraji	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Quipapá	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Tracunhaém	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
São Jose da Coroa Grande	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	0,0	0,0
Calcado	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Feira Nova	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Xexéu	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Jupi	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Jaqueira	-0,2	-0,2	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Cupira	-0,2	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Agrestina	-0,2	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Agregado Caetés/Capoeiras	-0,2	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Total	-7.629,8	-7.544,2	-85,6	-170	-169	-1	-5.579,5	-5.531,7	-47,9

De acordo com a Tabela 10 é no município de Ribeirão que ocorre a maior variação⁶⁶ dos indicadores econômicos (considerando o impacto total) no cenário referência. Os setores econômicos da região e as suas variações dos indicadores econômicos são mostrados na Tabela 11. Os setores com os maiores impactos são os mesmos que sofreram maiores reduções de alocação da água bruta⁶⁷, mesmo assim, uma maior redução da alocação da água bruta não implica necessariamente na mesma redução proporcional do valor da produção. Isso ocorre pelos diferentes coeficientes⁶⁸ da equação 32 da seção 3.6 por região e setor econômico.

⁶⁶ Nas regiões que compõem a “macrorregião das quatro bacias”.

⁶⁷ O setor do “cultivo da cana-de-açúcar” teve redução de 7 milhões de m³, o setor de “construção” teve redução de 21 mil m³, o setor de “fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos” teve redução de 54 mil m³, o setor de “cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente” teve redução de 1,5 mil m³, o setor de “outros da fruticultura” teve redução de 48 mil m³.

⁶⁸ Mais especificamente pelos coeficientes (por região e setor econômico) da água bruta e a elasticidade de produção da água bruta.

Tabela 11: Impacto na variação de produção, número de empregos e PIB na região de Ribeirão no cenário referência. Fonte: Elaboração própria do autor.

Região: Ribeirão	Δ do valor da produção em milhares de reais			Δ do emprego em número de postos de trabalho			Δ do PIB em milhares de reais		
Sector econômico ⁶⁹	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto
Cultivo de cana-de-açúcar	-2.600,3	-2.600,1	-0,2	-51	-51	0	-1.985,6	-1.985,6	-0,2
Construção	-179,7	-179,4	-0,3	-2	-2	0	-83,4	-83,3	-0,2
Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	-172,6	-172,0	-0,6	-2	-2	0	-58,3	-58,1	-0,2
Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	-114,8	-114,7	0,0	-15	-15	0	-90,3	-90,3	0,0
Outros da fruticultura	-46,8	-46,8	0,0	-1	-1	0	-31,3	-31,3	0,0
Distribuição de energia elétrica	-4,2	-3,1	-0,9	0	0	0	-1,4	-1,1	-0,3
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	-4,1	-3,6	-0,3	0	0	0	-2,4	-2,2	-0,2
Transporte terrestre	-3,1	-3,0	-0,2	0	0	0	-1,4	-1,3	0,0
Pecuária	-2,7	-2,5	-0,2	0	0	0	-1,7	-1,6	-0,2
Laticínios e Outros produtos alimentares	-2,4	-2,0	-0,3	0	0	0	-0,5	-0,5	0,0
Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	-1,9	-1,6	-0,2	0	0	0	-1,4	-1,3	-0,2

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

A Tabela 12 mostra a distribuição dos impactos calculados no cenário referência em cada um dos setores da matriz de Insumo-Produto, agregando-se os resultados para todas as macrorregiões consideradas, ou seja, esse é o impacto total em todo o território nacional. O setor com maior perda nos indicadores econômicos é o “cultivo da cana de açúcar” que é também o setor, no cenário referência, com a maior redução no atendimento da demanda por água requerida.

Na maioria dos setores econômicos o impacto indireto é uma pequena parcela quando comparado ao impacto direto, como é o caso do setor de “cultivo da cana-de-açúcar”, já explicado anteriormente. No entanto, existem setores em que o impacto indireto é significativo, como é o caso do “refino de petróleo e coquerias” em que o impacto indireto é de 158,3 mil reais (e maior do que o impacto direto no setor) e o setor de “extração de petróleo e gás natural” com impacto indireto de 107,8 mil reais. A extração de petróleo e gás natural e o

⁶⁹ Setores econômicos com variação do valor da produção superior a 1 mil reais.

refino de petróleo representam o processo industrial que transforma o petróleo bruto em uma matéria prima (como gasolina, diesel, lubrificantes, entre outros) de diversos outros produtos até chegar ao consumidor final. Tais setores econômicos resultam em produtos, que são utilizados como insumo por diversos outros setores. Bigaton et al. (2017) afirmam que para o plantio da cana-de-açúcar os principais insumos utilizados além da água são: fertilizantes, herbicidas, combustível para o maquinário e inseticidas. Como já mencionado anteriormente, o setor do cultivo da cana-de-açúcar em seis das regiões modeladas (a saber, Paudalho, Ribeirão, Sirinhaém, Barra de Guabiraba, Joaquim Nabuco e Cortês) nesse cenário, teve uma redução do valor da produção de 6.371,7 mil reais (o que representa 65,3% do impacto no valor da produção em todo território nacional) resultante da redução na alocação de água. Consequentemente, ocorre na economia uma redução da demanda pelos demais insumos do setor de cultivo de cana, o que implica uma diminuição da produção⁷⁰ dos setores que produzem tais insumos. Estes, por sua vez, utilizam como insumo os produtos derivados do petróleo e, portanto, resultando em um impacto indireto nos setores “refino de petróleo e coquerias” e “extração de petróleo e gás natural”. Esse resultado é obtido matematicamente, ao multiplicarmos o vetor de demanda final calculado nesse cenário pelas interações (a partir da segunda ordem)⁷¹ da matriz de coeficientes técnicos (matriz A)⁷². Através dessa multiplicação pode-se observar que os principais impactos indiretos nos setores de “refino de petróleo e coquerias” e “extração de petróleo e gás natural” são consequências da redução do valor da produção no setor do cultivo de cana-de-açúcar, o setor mais penalizado pela redução de água bruta.

O setor de “fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros” (setor com número 31 na Tabela 12) não tem o seu produto utilizado como insumo para o plantio da cana-de-açúcar, mas o mesmo é utilizado pelos setores que fornecem outros insumos para o cultivo da cana, como por exemplo, a “fabricação de adubos e fertilizantes” e “fabricação de defensivos agrícolas”. Assim, a redução no valor da produção do cultivo da cana-de-açúcar impacta tal setor de forma indireta, primeiro diminuindo a demanda pela produção de produtos dos setores: “fabricação

⁷⁰ O que pode ser visualizado na Tabela 12 pelo impacto direto do valor da produção nos setores “fabricação de adubos e fertilizantes”, “refino de petróleo e coquerias” e “fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários”.

⁷¹ Isto é, $A^2, A^3, A^4, \dots$

⁷² O impacto indireto na região r e setor econômico s é o resultado da linha $r * s$ da matriz $\Delta X - (I + A) \Delta Y$, além disso pela equação (25) da seção 3.6 temos que $\Delta X = (I + A)^{-1} \Delta Y$, portanto o impacto indireto pode ser calculado como a linha $r * s$ da matriz $(I + A)^{-1} \Delta Y - (I + A) \Delta Y = (A^2 + A^3 + \dots) \Delta Y$.

de adubos e fertilizantes” e “fabricação de defensivos agrícolas”. Estes, por sua vez, diminuem a demanda pelos produtos do setor “fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros”. Desta forma, explica-se o significativo impacto indireto no setor (coluna 4 da Tabela 12).

Tabela 12: Impacto agregado de todas as macrorregiões no valor da produção, número de postos de trabalho e PIB em cada setor da economia devido à redução no atendimento da demanda hídrica no cenário referência.

Impactos em todo Brasil		Δ do valor da produção em milhares de reais			Δ do número de empregos em postos de trabalho			Δ do PIB em milhares de reais		
Sector econômico	Número do setor	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto
Cultivo de milho	1	-9,0	-7,2	-1,7	-2	-1	0	-6,9	-5,8	-1,1
Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	2	-1,1	-0,3	-0,8	0	0	0	-0,6	-0,2	-0,5
Cultivo de cana-de-açúcar	3	-6.391,2	-6.384,2	-6,9	-126	-126	0	-4.877,6	-4.873,7	-3,9
Outros da fruticultura	4	-190,2	-186,5	-3,8	-4	-4	0	-127,1	-124,9	-2,2
Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	5	-208,9	-195,9	-13,2	-24	-24	0	-160,4	-152,4	-8,0
Pecuária	6	-174,7	-170,3	-4,2	-10	-9	0	-110,1	-107,8	-2,4
Produção florestal	7	-15,7	-11,8	-3,9	0	0	0	-11,2	-8,5	-2,7
Pesca e Aquicultura	8	-0,3	-0,2	0,0	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	9	-58,3	-12,3	-46,0	0	0	0	-31,7	-6,4	-25,3
Extração de petróleo e gás natural	10	-108,7	-0,9	-107,8	0	0	0	-67,7	-0,6	-67,1
Abate de animais exceto pescado	11	-4,7	-2,7	-2,0	0	0	0	-0,8	-0,5	-0,3
Preservação do pescado e fabricação de produtos do pescado	12	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Laticínios e Outros produtos alimentares	13	-10,7	-8,2	-2,7	0	0	0	-2,0	-1,6	-0,5
Fabricação e refino de açúcar	14	-12,3	-3,9	-8,3	0	0	0	-2,8	-0,9	-1,9
Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	15	-14,0	-9,1	-4,9	0	0	0	-2,4	-1,6	-0,8
Fabricação de alimentos para animais	16	-7,1	-5,7	-1,4	0	0	0	-1,1	-0,9	-0,2
Beneficiamento de produtos vegetais	17	-18,9	-15,1	-3,8	0	0	0	-3,0	-2,5	-0,6
Fabricação de bebidas alcoólicas	18	-0,5	-0,2	-0,5	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de bebidas não alcoólicas	19	-0,5	-0,2	-0,3	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de produtos têxteis	20	-6,6	-3,8	-2,8	0	0	0	-1,7	-1,1	-0,8
Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	21	-0,9	-0,2	-0,8	0	0	0	-0,5	0,0	-0,3

Fabricação de calçados e de artefatos de couro	22	-0,5	-0,2	-0,3	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de produtos da madeira	23	-7,5	-4,7	-2,8	0	0	0	-3,0	-1,9	-1,1
Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	24	-15,1	-5,0	-9,9	0	0	0	-4,4	-1,4	-2,8
Impressão e reprodução de gravações	25	-4,1	-0,2	-3,9	0	0	0	-1,9	0,0	-1,7
Refino de petróleo e coquearias	26	-271,6	-113,3	-158,3	0	0	0	11,0	4,6	6,4
Fabricação de álcool	27	-5,2	-0,5	-4,7	0	0	0	-0,9	-0,2	-0,9
Fabricação de biocombustíveis, exceto álcool	28	-5,8	-4,1	-1,7	0	0	0	-1,4	-0,9	-0,5
Fabricação de adubos e fertilizantes	29	-374,8	-360,5	-14,3	0	0	0	-30,5	-29,4	-1,1
Fabricação de produtos petroquímicos básicos	30	-34,4	-0,8	-33,6	0	0	0	-4,1	-0,2	-4,1
Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	31	-117,0	-36,1	-80,7	0	0	0	-20,0	-6,3	-13,7
Fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários	32	-164,9	-140,1	-24,8	0	0	0	-25,6	-21,8	-3,9
Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	33	-31,6	-9,1	-22,5	0	0	0	-7,2	-2,0	-5,2
Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	34	-7,2	-4,6	-2,7	0	0	0	-1,9	-1,3	-0,6
Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	35	-9,0	-6,3	-2,7	0	0	0	-4,1	-3,0	-1,3
Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	36	-34,1	-13,5	-20,4	0	0	0	-9,7	-3,9	-5,8
Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	37	-208,1	-200,1	-8,0	-2	-2	0	-70,5	-67,9	-2,8
Fabricação de cimento	38	-23,7	-17,9	-5,8	0	0	0	-8,5	-6,4	-2,0
Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	39	-19,0	-7,1	-11,9	0	0	0	-4,1	-1,6	-2,5
Metalurgia de metais não ferrosos	40	-5,3	-1,4	-3,9	0	0	0	-0,9	-0,3	-0,6
Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	41	-20,1	-9,1	-10,8	0	0	0	-8,2	-3,8	-4,4
Fabricação de produtos eletrônicos, equipamentos de comunicação e equipamentos de informática e periféricos	42	-1,6	-0,2	-1,4	0	0	0	-0,3	0,0	-0,3
Fabricação de equip. de medida, teste e controle, ópticos e eletro médicos	43	-0,5	-0,2	-0,3	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de eletrodomésticos	44	-0,3	0,0	-0,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	45	-9,0	-3,0	-6,0	0	0	0	-2,4	-0,8	-1,6

Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos	46	-9,1	-1,4	-7,7	0	0	0	-2,8	-0,5	-2,5
Fabricação de automóveis, camionetas, utilitários e caminhões e ônibus	47	-0,9	-0,2	-0,8	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	48	-7,7	-1,3	-6,4	0	0	0	-2,5	-0,5	-2,0
Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	49	-1,3	-0,2	-1,1	0	0	0	-0,3	0,0	-0,3
Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	50	-2,4	-0,8	-1,6	0	0	0	-1,1	-0,3	-0,8
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	51	-20,4	-4,9	-15,6	0	0	0	-8,3	-2,0	-6,3
Geração de energia elétrica	52	-53,4	-24,8	-28,6	0	0	0	-28,4	-13,2	-15,2
Transmissão de energia elétrica	53	-9,7	-5,0	-4,7	0	0	0	-4,9	-2,5	-2,4
Distribuição de energia elétrica	54	-44,8	-23,1	-21,8	0	0	0	-15,7	-8,0	-7,7
Produção e distribuição de gás natural e outras utilidades	55	-8,5	-5,0	-3,3	0	0	0	-2,8	-1,7	-1,1
Água e esgoto	56	-6,1	-0,9	-5,3	0	0	0	-3,3	-0,5	-2,8
Resíduos	57	-2,0	-0,5	-1,4	0	0	0	-1,4	-0,3	-1,1
Construção	58	-200,3	-192,1	-8,2	-3	-3	0	-93,0	-89,2	-3,8
Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	59	-9,4	-3,3	-6,1	0	0	0	-6,0	-2,2	-3,8
Comércio atacadista	60	-226,4	-135,7	-90,5	-1	-1	0	-150,5	-93,0	-57,5
Comércio varejista	61	-4,7	-0,3	-4,4	0	0	0	-3,3	-0,3	-3,1
Transporte terrestre	62	-154,7	-87,7	-67,1	-2	-1	-1	-69,1	-38,8	-30,3
Transporte dutoviário de carga	63	-5,7	0,0	-5,7	0	0	0	-2,0	0,0	-2,0
Transporte aquaviário	64	-6,9	-0,5	-6,3	0	0	0	-2,2	-0,2	-2,0
Transporte aéreo	65	-5,5	-0,5	-4,9	0	0	0	-1,3	-0,2	-1,1
Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	66	-32,4	-8,6	-23,7	0	0	0	-18,5	-4,7	-13,8
Alojamento	67	-2,2	-0,3	-1,9	0	0	0	-1,3	-0,2	-1,1
Alimentação	68	-2,7	0,0	-2,5	0	0	0	-1,3	0,0	-1,3
Edição e edição integrada à impressão	69	-2,0	0,0	-2,0	0	0	0	-0,9	0,0	-0,9
Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	70	-30,6	-1,7	-28,7	0	0	0	-15,2	-0,9	-14,3
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	71	-134,0	-68,2	-65,8	0	0	0	-79,3	-40,2	-39,1

Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	72	-138,6	-17,0	-121,6	-1	0	-1	-106,5	-13,5	-93,0
Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	73	-17,4	-4,9	-12,6	0	0	0	-12,6	-3,6	-9,0
Educação	74	-4,7	-0,6	-3,9	0	0	0	-3,6	-0,5	-3,0
Saúde	75	-0,3	0,0	-0,3	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	76	-6,6	-1,7	-4,9	0	0	0	-4,1	-1,1	-3,0

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

4.2 CENÁRIO ALTERNATIVO– MUDANÇA NA ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS EM 2012

Foi visto na seção 4.1 que a precipitação no ano de 2011 foi suficiente para deixar os níveis dos reservatórios, representados na rede simplificada, próximos à capacidade máxima, tendo os reservatórios sido utilizados intensamente no ano de 2012 para suprir a diminuição da oferta de água bruta devido à seca desse ano. Sabe-se hoje, que o ano de 2012 iniciou uma série de anos extremamente secos, que se estendeu até 2018 e cujo uso intenso dessa acumulação já no primeiro ano de seca, impôs restrições muito severas e perdas econômicas elevadas nos anos seguintes na área estudada⁷³. Assim, é de interesse avaliar as consequências econômicas e sociais do uso de estratégias de operação diferentes das utilizadas, por exemplo, estratégias de operação dos reservatórios da região mais conservadora no ano de 2012. Na verdade, de maior interesse seria que esses impactos fossem mensurados não só em 2012, mas em anos seguintes, o que pretende-se fazê-lo na continuidade da pesquisa. Dado que este estudo é uma proposta metodológica de integração das modelagens e um primeiro teste dessa junção, já serão de

⁷³ Na seca iniciada em 2012, dos 28 municípios em colapso em Pernambuco, 25 eram do Agreste e apenas duas das suas 71 cidades não decretaram estado de emergência no final de 2016. Significativas perdas econômicas foram registradas, principalmente nos setores mais intensivos em água como a bacia leiteira (redução na produção de 45%) e a produção de jeans. As lavanderias, consideradas o coração do pólo têxtil do Agreste, foram em grande número fechadas, muitas pelos altos custos da água devido ao colapso do mais importante reservatório da região, Jucazinho. (Texto da profa. Alcoforado de Moraes publicado em jornal impresso DP em 2018)

utilidade os resultados deste primeiro ano na medida em que mostrarão a viabilidade de obtenção de resultados como esses.

Assim, o cenário alternativo proposto nesta seção simulará uma estratégia mais conservadora da utilização dos reservatórios no ano de 2012, o primeiro de uma série de anos secos. É esperado que os impactos econômicos e sociais calculados nesse cenário sejam piores do que os encontrados no cenário referência, já que uma menor quantidade de água bruta dos reservatórios será liberada para alocação aos nós de uso.

A Tabela 13 mostra os volumes observados nos reservatórios em Dez/12⁷⁴. Ela mostra dez dos dezesseis reservatórios modelados na rede simplificada. Como foi visto na seção 3.2, os outros seis⁷⁵ reservatórios não tinham observações registradas do volume em uma data próxima a Dez/2012. Por isso, não foram consideradas na modelagem da alocação da água bruta no cenário alternativo, restrições adicionais sobre volumes utilizados⁷⁶ desses reservatórios. Para cada um dos dez reservatórios da Tabela 13, o volume a ser atingido como restrição mínima em Dez/2012 no cenário alternativo é o ponto médio entre o volume observado em Jan/2012 e Dez/2012⁷⁷.

⁷⁴ O volume histórico dos reservatórios de Pernambuco é fornecido pelo site da APAC no endereço http://200.238.109.99:8080/apacv5/cons_monitora_web/cons_monitora_web.php (último acesso em 29/08/2019).

⁷⁵ A saber: Açude Machado, Barragem Tabocas-Piaça, Barragem Mateus Vieira, Barragem Pau-Ferro, Barragem Caianinha e Reservatório Amora Grande.

⁷⁶ Para esses reservatórios os volumes no início de 2012 são os valores mais próximos observados na data de Jan/2012. A modelagem no cenário alternativo decide quais são os volumes desses reservatórios nos meses posteriores sem restrição ao final do ano. No total em Jan/2012 esses reservatórios possuem volume agregado de 15,3 milhões de m³, esse valor representa 2,9% quando comparados ao valor observado em Jan/2012 dos reservatórios da Tabela 13.

⁷⁷ Por exemplo, o açude Jucazinho o ponto médio entre os dois valores observados é igual a $\frac{(300,93 - 197,92)}{2} + 197,92 = 249,43$.

Tabela 13: Níveis dos reservatórios observados em Jan/2012 e Dez/ 2012 e volumes utilizados como restrições mínimas no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor com informações da APAC.

Reservatório	Bacia	Volume observado em Jan/2012 (em milhões de m ³)	Volume observado em Dez/2012 (em milhões de m ³)	Volume utilizado no cenário alternativo como restrição em Dez/2012 (em milhões de m ³)
Açude Poço Fundo	Capibaribe	9,30	1,88	5,59
Açude Jucazinho (Antônio Gouveia Neto)	Capibaribe	300,93	197,92	249,43
Barragem Engenheiro Cercino Pontos (Tabocas)	Capibaribe	10,74	2,32	6,53
Barragem de Carpina	Capibaribe	62,86	56,51	59,69
Açude Goitá	Capibaribe	52,60	40,93	46,77
Açude Cursai	Capibaribe	13,27	10,89	12,08
Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)	Ipojuca	27,68	19,27	23,48
Barragem do Prata (do Alemão)	Una	38,38	20,88	29,63
Barragem Poço da Areia (Bitá)	Una	1,32	0,36	0,84
Barragem Caianinha	Una	1,24	0,83	1,03
Total		518,3	351,8	435,1

A modelagem de otimização da alocação no cenário alternativo consiste das equações, variáveis e parâmetros já descritos na seção 3.4 adicionadas às seguintes restrições: volumes mínimos em cada um dos dez reservatórios vistos na Tabela 13 em Dez/2012 dados pelo valor médio como descrito acima; prioridade no abastecimento público e restrições de volume morto e capacidade máxima em todos os reservatórios em todos os meses. A solução encontrada na otimização no cenário alternativo representa uma gestão de reservatórios mais conservadora na medida em que obriga que os dez principais reservatórios cheguem ao final do ano com volumes bem maiores em relação ao cenário referência.

Assim como no cenário referência, a solução do modelo de alocação de água distribui o recurso hídrico nos 273 nós de demanda da rede simplificada. Podemos calcular a partir daí a variação da alocação da água em cada nó de demanda fazendo a diferença entre o valor requerido e o valor alocado. Posteriormente, agregando esses valores por região e setor econômico pode-se calcular a variação da alocação de água bruta em cada região e setor econômico da matriz de Insumo-Produto. Dessa forma, encontra-se o vetor ΔAB (da seção 3.6) para o ano de 2012 e no cenário alternativo.

A Tabela 14 mostra os resultados do modelo de otimização maximizando-se o atendimento no cenário alternativo agregados por região e setor econômico, totalizando assim, as demandas de água bruta que não foram totalmente atendidas no cenário alternativo. Ao todo são 64 nós de demanda que sofrem redução no atendimento nesse cenário (37 a mais do que as do cenário referência), o que corresponde a 23,5% do total de nós de demanda. O setor da economia com maiores reduções no atendimento em valor absoluto (em milhões de m³) é também neste cenário o cultivo da cana de açúcar com a redução no atendimento de 24,1 milhões de m³.

Tabela 14 Demanda requerida total, vazão alocada, demanda não atendida e percentual não atendido de água bruta por setor econômico e região⁷⁸ da matriz de Insumo-Produto no cenário alternativo no ano de 2012. Fonte: Elaboração própria do autor.

Região	Setor econômico	Demanda requerida (em milhões de m ³)	Demanda alocada (em milhões de m ³)	Redução no atendimento da água bruta (ΔAB) (em milhões de m ³)	% não atendido	Bacia	Nó de oferta
Total		95,26	69,27	25,98	27,3%		
PAUDALHO	Cultivo de cana-de-açúcar	14,55	3,09	11,45	78,7%	Capibaribe	Açude Cursai
RIBEIRÃO	Cultivo de cana-de-açúcar	27,10	20,09	7,01	25,9%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
CHÃ DE ALEGRIA	Cultivo de cana-de-açúcar	8,66	6,68	1,98	22,9%	Capibaribe	Açude Goitá
PAUDALHO	Cultivo de cana-de-açúcar	2,35	0,96	1,39	59,1%	Capibaribe	Afluente do rio Capibaribe
LAGOA DE ITAENGA	Cultivo de cana-de-açúcar	3,60	2,26	1,35	37,4%	Capibaribe	Açude Goitá
SIRINHAÉM	Cultivo de cana-de-açúcar	11,39	10,94	0,45	3,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BELO JARDIM	Fabricação de alimentos para animais	0,46	0,05	0,42	90,0%	Ipojuca	Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)
JOAQUIM NABUCO	Cultivo de cana-de-açúcar	1,16	0,94	0,22	18,8%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CARUARU	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,20	-	0,20	100,0%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
POMBOS	Pesca e Aquicultura	0,89	0,71	0,18	19,9%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BARRA DE GUABIRABA	Outros da fruticultura	0,81	0,68	0,13	15,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de cana-de-açúcar	0,64	0,52	0,12	18,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CARUARU	Comércio atacadista	0,09	0,02	0,08	83,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
PAUDALHO	Cultivo de cana-de-açúcar	2,60	2,53	0,08	2,9%	Capibaribe	Açude Goitá
CHÃ DE ALEGRIA	Comércio atacadista	0,25	0,18	0,07	28,8%	Capibaribe	Açude Goitá
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,28	0,22	0,06	23,1%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém

⁷⁸ Regiões e setores econômicos em que a demanda por água bruta não foi totalmente atendida no cenário alternativo.

BELO JARDIM	Abate de animais exceto pescado	0,08	0,01	0,06	83,3%	Ipojuca	Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)
SIRINHAÉM	Transporte terrestre	0,43	0,37	0,06	14,4%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,32	0,27	0,05	16,7%	Sirinhaém	Afluentes do rio Sirinhaém
RIBEIRÃO	Outros da fruticultura	0,15	0,10	0,05	33,0%	Sirinhaém	Afluentes do rio Sirinhaém
CORTÊS	Cultivo de cana-de-açúcar	15,62	15,58	0,05	0,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
AMARAJI	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,20	0,16	0,05	23,5%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BONITO	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,12	0,08	0,04	31,9%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BEZERROS	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,45	0,42	0,04	8,5%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SAIRÉ	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,43	0,40	0,04	8,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
CORTÊS	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,13	0,09	0,03	26,1%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SÃO BENTO DO UNA	Pecuária	0,04	0,00	0,03	91,8%	Ipojuca	Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)
CARUARU	Fabricação de produtos têxteis	0,04	0,01	0,03	83,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BARRA DE GUABIRABA	Cultivo de milho	0,10	0,07	0,02	24,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
IPOJUCA	Construção	0,44	0,42	0,02	5,1%	Ipojuca	Stream10805
RIBEIRÃO	Construção	0,11	0,09	0,02	20,0%	Sirinhaém	Afluentes do rio Sirinhaém
SAIRÉ	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,24	0,22	0,02	8,2%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BEZERROS	Cultivo de milho	0,10	0,08	0,02	18,2%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
AMARAJI	Outros da fruticultura	0,11	0,09	0,02	16,0%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BELO JARDIM	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,02	0,00	0,02	91,8%	Ipojuca	Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)
CARUARU	Construção	0,02	0,00	0,01	83,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BONITO	Cultivo de milho	0,11	0,09	0,01	11,7%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém

CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Cultivo de milho	0,04	0,03	0,01	24,3%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
GRAVATÁ	Outros da fruticultura	0,06	0,05	0,01	17,4%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
CHÃ GRANDE	Cultivo de milho	0,06	0,05	0,01	17,4%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SAIRÉ	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,50	0,49	0,01	1,7%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
GRAVATÁ	Outros da fruticultura	0,05	0,04	0,01	17,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CARUARU	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,01	-	0,01	100,0%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
CARUARU	Abate de animais exceto pescado	0,01	0,00	0,01	83,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SANHARÓ	Pecuária	0,01	0,00	0,01	83,3%	Ipojuca	Açude Belo Jardim (Pedro Moura Júnior)
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,02	0,02	0,01	23,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
PRIMAVERA	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,02	0,01	0,01	26,9%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
BEZERROS	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,05	0,05	0,00	8,2%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Outros da fruticultura	0,02	0,01	0,00	25,4%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,02	0,01	0,00	22,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CARUARU	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,00	0,00	0,00	83,3%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SAIRÉ	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,04	0,03	0,00	8,2%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
CHÃ GRANDE	Outros da fruticultura	0,01	0,01	0,00	18,5%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SAIRÉ	Cultivo de milho	0,00	0,00	0,00	38,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém

SÃO LOURENÇO DA MATA	Cultivo de cana-de-açúcar	0,01	0,01	0,00	18,4%	Capibaribe	Açude Goitá
CARUARU	Cultivo de milho	0,01	0,01	0,00	17,7%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
RIBEIRÃO	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00	0,00	0,00	52,2%	Sirinhaém	Afluente do rio Sirinhaém
GAMELEIRA	Construção	0,02	0,01	0,00	8,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
SAIRÉ	Outros da fruticultura	0,01	0,00	0,00	25,6%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
BEZERROS	Outros da fruticultura	0,01	0,00	0,00	23,5%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
SÃO JOAQUIM DO MONTE	Cultivo de milho	0,00	0,00	0,00	30,2%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
GRAVATÁ	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00	0,00	0,00	26,6%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca
CAMOCIM DE SÃO FÉLIX	Pecuária	0,01	0,01	0,00	8,5%	Sirinhaém	Ao longo do rio Sirinhaém
CHÃ GRANDE	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00	0,00	0,00	26,5%	Ipojuca	Ao longo do rio Ipojuca

4.2.1 Ligação com a modelagem de Insumo-Produto.

Analogamente ao que foi feito na seção 4.1.1 definimos da mesma forma as variáveis exógenas e endógenas ao sistema de equações (38) da seção 3.6, isto é, quando ocorre a variação de alocação da água bruta ($\Delta AB_s^r \neq 0$) na solução do modelo de alocação de água, definimos a variável (ΔAB_s^r) como exógena e quando não ocorre a variação da alocação da água bruta (isto é, $\Delta AB_s^r = 0$) definimos a variável da demanda final (Δy_s^r) como exógena, igualando-a a zero. As outras variáveis são endógenas ao modelo. Portanto o sistema de equações (38) da seção 3.6 fica com o mesmo número de equações e variáveis endógenas (11.400) e consequentemente pode-se calcular uma solução.

Como ocorre na seção 4.1.1 pode-se observar que são obtidos dois vetores da variação da alocação de água bruta (ΔAB) diferentes, o primeiro vem da solução do modelo de alocação de água⁷⁹ visto na seção 3.4 e o segundo é solução das equações em (38) descrita no parágrafo anterior. Esses valores agregados por região são mostrados na Tabela 15 para cada uma das regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias. A soma da diferença entre as duas soluções em valor absoluto nas regiões que tem algum percentual nas quatro bacias interligadas

⁷⁹ Com os valores agregados por regiões e setores econômicos da matriz de Insumo-Produto.

(em todas as regiões e setores econômicos), foi de $\sum_r \sum_s |\Delta AB_s^r - \Delta AB_s'^r| = 36,5$ mil m³ (coluna 4 da Tabela 15), esse valor equivale a 0,16% da redução encontrada no modelo de alocação de água da seção 3.4 (a redução nesse caso foi de 25,98 milhões de m³ como pode ser visto na coluna 2 da Tabela 15) e equivale a 0,0017% quando comparado a demanda por água bruta na região. Consequentemente podemos dizer que as duas soluções são suficientemente próximas.

Tabela 15: Variação de água bruta resultante da solução do modelo de alocação de água e resultante da solução da integração entre as modelagens em cada uma das 71 regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias.

Regiões	ΔAB – Solução do modelo de alocação de água (redução da água bruta em m ³)	$\Delta AB'$ - Solução da integração entre as modelagens (redução da água bruta em m ³)	Diferença em valor absoluto (em m ³)
Total	25.982.711	26.019.296	36.585
Agregado Jucazinho	0	253	253
Agregado Bitury	37.632	44.825	7.193
Agregado Caetés/Capoeiras	0	18	18
Agrestina	0	0	0
Água Preta	0	1.363	1.363
Altinho	0	0	0
Amaraji	64.592	64.592	0
Arcoverde	0	84	84
Barra de Guabiraba	335.946	335.946	0
Barreiros	0	0	0
Belem de Maria	0	0	0
Belo Jardim	497.120	498.853	1.733
Bezerras	62.531	62.611	80
Bonito	51.396	51.397	1
Brejo da Madre de Deus	0	447	447
Calcado	0	0	0
Camaragibe	0	11	11
Camocim de São Felix	14.876	14.876	0
Canhotinho	0	1.346	1.346
Carpina	0	0	0
Caruaru	339.083	332.193	-6.890
Catende	0	332	332
Cha de Alegria	2.053.602	2.053.603	1
Cha Grande	13.160	13.160	0
Cortes	81.062	81.062	0
Cupira	0	0	0
Escada	0	1.994	1.994
Feira Nova	0	0	0
Gameleira	1.332	1.332	0
Gloria do Goitá	0	0	0
Gravata	18.909	19.149	240

Ibirajuba	0	2.113	2.113
Ipojuca	22.481	32.245	9.764
Jaqueira	0	77	77
Jataúba	0	0	0
Joaquim Nabuco	216.782	217.004	222
Jucati	0	0	0
Jupi	0	0	0
Jurema	0	0	0
Lagoa do Carro	0	0	0
Lagoa do Itaenga	1.345.759	1.347.114	1.355
Lagoa dos Gatos	0	0	0
Lajedo	0	0	0
Limoeiro	0	128	128
Maraial	0	0	0
Moreno	0	815	815
Palmares	0	143	143
Panelas	0	0	0
Paudalho	12.920.421	12.922.051	1.630
Poção	0	0	0
Pombos	176.998	177.020	22
Primavera	5.047	5.047	0
Quipapá	0	0	0
Recife	0	131	131
Ribeirão	7.133.436	7.135.383	1.947
Rio Formoso	0	49	49
Saire	70.398	70.398	0
Santa Cruz do Capibaribe	0	0	0
São Benedito do Sul	0	0	0
São Caitano	0	0	0
São Joaquim do Monte	10.256	10.521	265
São Jose da Coroa Grande	0	0	0
São Lourenço da Mata	1.780	1.920	140
Sirinhaem	508.112	508.423	311
Tamandaré	0	13	13
Taquaritinga do Norte	0	45	45
Toritama	0	1.162	1.162
Tracunhaém	0	6.244	6.244
Venturosa	0	0	0
Vitoria de Santo Antão	0	1.803	1.803
Xexéu	0	0	0

A solução do sistema de equações em (38) da seção 3.6 nos dá o vetor da variação de água bruta (ΔAB), a variação no vetor de produção total (ΔX) e o vetor de demanda final (ΔY). Através dos vetores ΔX e ΔY fazemos a mensuração dos impactos econômicos diretos e indiretos como também do efeito transbordamento.

4.2.2 Análise de resultados do cenário alternativo.

A Tabela 16 resume os impactos nos indicadores econômicos e sociais no cenário alternativo, por macrorregiões. Todas as macrorregiões têm impactos negativos que foram gerados originalmente pela redução no atendimento da água bruta dos usuários na macrorregião das quatro bacias.

Comparando a Tabela 16 com a Tabela 8 observamos que o cenário alternativo, que simula maiores restrições à utilização dos volumes armazenados nos reservatórios, e, portanto, reduz os atendimentos, apresenta impactos econômicos e sociais mais acentuados do que no cenário referência. A macrorregião das quatro bacias no cenário alternativo quando comparado ao cenário referência tem uma redução (a mais) de 313,5 milhões de reais no valor da produção, uma perda superior de 5.481 postos de trabalho e uma redução (a mais) de 165,3 milhões de reais no PIB. Estes impactos negativos na economia, na verdade, foram evitados pela utilização dos reservatórios no ano em questão que é a diferença entre os cenários. No entanto, para verificar a diferença real entre as duas estratégias de operação nos reservatórios, teriam que ser comparados os impactos nos anos posteriores (2013-2018) de seca, diante da maior ou menor oferta nestes anos, que estratégias mais ou menos conservadoras assegurariam.

Como consequência da escolha das variáveis exógenas e endógenas na seção 4.2.1 a variação de demanda final ocorre somente nas regiões que pertencem a macrorregião das quatro bacias, portanto o impacto nas outras macrorregiões resto de Pernambuco (coluna 3 da Tabela 16), resto do Nordeste (coluna 4 da Tabela 16) e resto do Brasil (coluna 5 da Tabela 16) ocorrem pelo efeito transbordamento. Nessas macrorregiões o efeito transbordamento representou 19,5% do impacto total.

Diferentemente do cenário referência, em que a maior parte do impacto econômico na macrorregião das quatro bacias ocorreu no mesmo setor e nas regiões em que a redução no atendimento foi maior (cultivo da cana-de-açúcar), no cenário alternativo diversas outras regiões e setores econômicos tiveram redução significativa no valor da produção⁸⁰. Destacam-se o setor econômico da “construção” com uma redução de 64,9 milhões de reais (20% do impacto total na macrorregião das quatro bacias), o setor econômico do “comércio atacadista” com uma redução de 63,9 milhões de reais (19,8% do impacto total na macrorregião das quatro

⁸⁰ No total são 230 regiões e setores econômicos diferentes que tiveram redução superior a 0,1 milhão de reais.

bacias) e o setor econômico da “pecuária” com uma redução de 44,6 milhões de reais (13,8% do impacto total na macrorregião das quatro bacias). A variação de demanda final (ΔY) entre essas regiões e setores econômicos possuem valores similares à variação do valor da produção, sendo a do setor econômico “construção” na região de Caruaru de 61,3 milhões de reais (94,2% do valor de variação da produção), o setor “comércio atacadista” na região de Caruaru de 60, milhões de reais (93,6% do valor de variação da produção) e o setor econômico da “pecuária” na região do Agregado Bitury de 42,9 milhões de reais (95,7% do valor de variação da produção). Esses valores são explicados pela variação da água bruta nessas mesmas regiões e setores econômicos que multiplicados pelos coeficientes da equação (32) da seção 3.6 implicam na variação do valor da produção. Por outro lado, as principais regiões e setores econômicos, que utilizam os produtos destes setores como insumo, tiveram pouca variação na alocação da água bruta e consequentemente pouca variação no valor da produção, mantendo a demanda pelos insumos. Assim para a economia voltar ao equilíbrio representado pela equação (25) da seção 3.6, a redução na produção dessas regiões e setores econômicos foi simulada via demanda final. Portanto, a redução do valor da produção e demanda final nessas regiões e setores econômicos são similares. Como a demanda final é uma parcela do impacto direto temos que a maior parte do impacto total nessas regiões e setores econômicos ocorrem como consequência do impacto direto. Explicando, portanto, o valor do impacto indireto na macrorregião das quatro bacias apenas 4,1% do impacto total.

Tabela 16: Impactos no valor da produção, número de empregos e no PIB em milhões de reais no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.

Cenário alternativo	Região das quatro bacias	Resto de Pernambuco	Resto do Nordeste	Resto do Brasil	Brasil	Efeitos do impacto
Δ do valor da produção (em milhões de reais)	-322,5	-15,6	-14,8	-74,8	-427,8	Impacto direto e indireto
	-309	-11	-7	-29	-357	Impacto direto
	-13,5	-4,4	-7,5	-45,6	-70,8	Impacto indireto
Δ do emprego (em número de postos de trabalho)	-5651	-241	-214	-380	-6485	Impacto direto e indireto
	-5504	-199	-137	-170	-6010	Impacto direto
	-147	-41	-77	-209	-475	Impacto indireto
Δ do PIB (em milhões de reais)	-170,8	-6,9	-5,8	-30,2	-213,8	Impacto direto e indireto
	-163,4	-5,0	-2,8	-11,0	-182,1	Impacto direto
	-7,4	-1,9	-3,0	-19,2	-31,6	Impacto indireto

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

A Tabela 17 compara o impacto nos indicadores sociais e econômicos do cenário alternativo com os valores observados da matriz de Insumo-Produto para as macrorregiões. Como podemos ver na tabela os impactos são mais significativos na macrorregião das quatro bacias com uma redução de 0,19% no valor da produção, 0,28% no número de postos de trabalho e 0,17% no PIB. Apesar desses valores parecerem pequenos devemos observar que no ano de 2012 o PIB em todo o estado de Pernambuco cresceu 2,3% (segundo dados do IBGE), portanto a seca foi um limitador para o crescimento na região do agreste de Pernambuco

Tabela 17: Variação nos indicadores sociais e econômicos do cenário alternativo, valor observado na matriz de Insumo-Produto e variação percentual. Fonte: Elaboração própria do autor.

	Macrorregião das quatro bacias	Resto de Pernambuco	Resto do Nordeste	Resto do Brasil	Brasil	Indicador social e econômico
Δ do impacto no cenário alternativo	-322,5	-15,6	-14,8	-74,8	-427,8	Valor da produção (em milhões de reais)
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	168.127	92.506	1.209.907	10.208.581	11.679.121	
Δ %	-0,192%	-0,017%	-0,001%	-0,001%	-0,004%	
Δ do impacto no cenário alternativo	-5651	-241	-214	-380	-6485	Número de postos de trabalho
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	2.011.522	1.233.352	16.884.836	79.432.087	99.561.796	
Δ %	-0,281%	-0,020%	-0,001%	0,000%	-0,007%	
Δ do impacto no cenário alternativo	-170,8	-6,9	-5,8	-30,2	-213,8	PIB (em milhões de reais)
Valor observado na matriz de Insumo-Produto	96.855	50.295	655.212	5.037.871	5.840.233	
Δ %	-0,176%	-0,014%	-0,001%	-0,001%	-0,004%	

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

A Tabela 18 mostra os impactos econômicos e sociais em todas as 71 regiões que compõem a macrorregião das quatro bacias no cenário alternativo. Como podemos ver, a região com maior impacto nos indicadores econômicos é a região de Caruaru, em que o impacto gerado no cenário alternativo no valor da produção corresponde a 58,9% do impacto total no valor da produção da macrorregião inteira, ou seja, da região das quatro bacias interligadas. O que é interessante observar (ver coluna 3 da Tabela 15) é que nessa região ocorreu apenas 1,3% de redução no atendimento de água bruta nesse ano e sob esse cenário. Para explicar o impacto econômico tão significativo nessa região, mesmo com uma pequena redução na alocação de água bruta, deve-se atentar para os setores dessa região em que ocorrem as maiores variações do valor da produção devido a reduções na alocação de água bruta (a equação 36 da seção 3.6). Os setores

mais afetados nessa região são: “construção” (34,2% do impacto total no valor da produção da região), “comércio atacadista” (33,7% do impacto total no valor da produção da região), “fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos” (9,2% do impacto total do valor da produção da região) e “confecção de artefatos do vestuário e acessórios” (8,7% do impacto total no valor da produção da região). Pode-se ver que a relação que transforma a variação da água bruta em variação do valor da produção depende dos coeficientes de água bruta e das elasticidades, que são diferentes dependendo da região e do setor econômico. Por exemplo, quando comparado ao setor do “cultivo da cana-de-açúcar” (responsável por 92,6% da variação da água bruta na macrorregião das quatro bacias), esses setores tiveram menor variação de água bruta, mas ocasionaram uma maior variação em valor da produção. Mesmo assim, se desconsiderarmos a variação de água que ocorreu no setor do “cultivo da cana-de-açúcar” na macrorregião das quatro bacias, são nos setores citados acima na região de Caruaru que ocorrem as maiores variações da alocação de água bruta entre todas as regiões e setores econômicos que compõem a macrorregião das quatro bacias, e multiplicados pelos coeficientes explicam a maior variação nos indicadores econômicos dessa região.

Tabela 18: Regiões da macrorregião da área de estudo os impactos econômicos e sociais no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.

Regiões	Δ do valor da produção em milhões de reais			Δ do emprego em número de postos de trabalho			Δ do PIB em milhões de reais		
	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto
Caruaru	-190,2	-185,4	-4,9	-2.176	-2.132	-44	-101,2	-98,5	-2,7
Agregado Bitury	-45,6	-45,2	-0,3	-2.498	-2.489	-9	-28,7	-28,6	-0,2
Belo Jardim	-26,1	-25,6	-0,5	-159	-155	-4	-5,8	-5,7	-0,2
Ipojuca	-25,8	-24,3	-1,4	-319	-309	-10	-12,6	-11,8	-0,8
Recife	-12,7	-8,0	-4,7	-82	-51	-31	-6,9	-4,2	-2,7
Bezerros	-7,2	-7,1	-0,2	-57	-55	-2	-5,7	-5,7	0,0
Paudalho	-3,5	-3,5	0,0	-73	-72	-1	-2,5	-2,5	0,0
Ribeirão	-3,1	-3,1	0,0	-72	-71	-1	-2,4	-2,2	0,0
Cha de Alegria	-1,1	-0,9	0,0	-13	-13	0	-0,8	-0,8	0,0
São Lourenço da Mata	-0,9	-0,9	0,0	-15	-15	-1	-0,6	-0,6	0,0
Sirinhaem	-0,8	-0,6	-0,2	-15	-13	-2	-0,6	-0,5	-0,2
Lagoa do Itaenga	-0,5	-0,5	0,0	-9	-9	0	-0,3	-0,3	0,0
Vitoria de Santo Antão	-0,5	-0,3	-0,2	-6	-5	-1	-0,2	-0,2	0,0
Carpina	-0,3	-0,3	-0,2	-6	-5	-1	-0,2	-0,2	0,0
Barra de Guabiraba	-0,3	-0,3	0,0	-8	-7	-2	-0,3	-0,3	0,0

Gravata	-0,3	-0,2	-0,2	-5	-3	-2	-0,2	0,0	0,0
Agregado Jucazinho	-0,3	-0,2	0,0	-10	-9	-1	-0,2	-0,2	0,0
Moreno	-0,2	-0,2	0,0	-6	-5	-1	-0,2	-0,2	0,0
Camaragibe	-0,2	-0,2	0,0	-2	-2	0	-0,2	0,0	0,0
Saire	-0,2	0,0	-0,2	-5	-2	-3	-0,2	0,0	-0,2
Camocim de São Felix	-0,2	-0,2	0,0	-11	-9	-2	-0,2	-0,2	0,0
Bonito	-0,2	-0,2	0,0	-11	-7	-3	-0,2	-0,2	0,0
Santa Cruz do Capibaribe	-0,16	-0,16	0,00	-2	-2	0	-0,08	-0,05	-0,02
Escada	-0,16	-0,16	0,00	-2	-1	0	-0,05	-0,03	-0,02
Lajedo	-0,16	-0,16	0,00	-3	-3	0	-0,06	-0,05	-0,02
Arcoverde	-0,16	-0,16	0,00	-2	-2	0	-0,06	-0,05	-0,02
Limoeiro	-0,16	-0,16	0,00	-3	-2	0	-0,05	-0,05	-0,02
Toritama	-0,16	-0,16	0,00	-1	-1	0	-0,05	-0,03	-0,02
Jupi	-0,16	0,00	-0,16	-5	-5	0	-0,06	-0,05	0,00
Joaquim Nabuco	-0,16	-0,16	0,00	-2	0	-2	-0,06	0,00	-0,06
Jucati	-0,16	0,00	0,00	-5	-5	0	-0,06	-0,05	0,00
Pombos	-0,16	0,00	0,00	-3	-3	0	-0,05	-0,05	-0,02
São Caetano	-0,16	-0,16	0,00	-3	-3	0	-0,05	-0,03	0,00
Agregado Caetés/Capoeiras	-0,08	-0,06	0,00	-4	-4	0	-0,05	-0,05	0,00
Palmares	-0,08	-0,05	-0,02	-1	-1	0	-0,05	-0,03	-0,02
Lagoa do Carro	-0,08	-0,06	-0,02	-3	-3	0	-0,05	-0,03	0,00
Amaraji	-0,06	-0,02	-0,05	-4	-1	-4	-0,05	-0,02	-0,03
Cha Grande	-0,06	-0,03	-0,05	-4	0	-4	-0,05	-0,02	-0,03
Agrestina	-0,06	-0,05	0,00	-3	-3	0	-0,03	-0,03	0,00
Gloria do Goitá	-0,05	-0,05	0,00	-2	-2	0	-0,03	-0,03	0,00
Taquaritinga do Norte	-0,05	-0,05	-0,02	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
São Joaquim do Monte	-0,05	-0,02	-0,03	-4	-1	-2	-0,03	-0,02	-0,03
Canhotinho	-0,05	-0,05	0,00	-3	-3	0	-0,03	-0,03	0,00
Cupira	-0,05	-0,05	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Brejo da Madre de Deus	-0,05	-0,05	0,00	-2	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Tracunhaém	-0,05	-0,05	0,00	-2	-2	0	-0,03	-0,03	0,00
Poção	-0,05	-0,03	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Venturosa	-0,05	-0,03	0,00	-2	-2	0	-0,03	-0,02	0,00
Barreiros	-0,05	-0,03	-0,02	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Primavera	-0,03	0,00	-0,03	-4	0	-4	-0,03	0,00	-0,03
Cortes	-0,03	0,00	-0,03	-2	0	-2	-0,02	0,00	-0,02
Água Preta	-0,03	-0,03	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Altinho	-0,03	-0,03	0,00	-2	-2	0	-0,02	-0,02	0,00
Rio Formoso	-0,03	-0,02	-0,02	0	0	0	-0,02	0,00	0,00
Calçado	-0,03	-0,03	0,00	-2	-2	0	-0,02	-0,02	0,00
Ibirajuba	-0,03	-0,03	0,00	-2	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Catende	-0,03	-0,02	0,00	0	0	0	-0,02	-0,02	0,00
Quipapá	-0,02	-0,02	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00

Panelas	-0,02	-0,02	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Jataúba	-0,02	-0,02	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
São Benedito do Sul	-0,02	-0,02	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Feira Nova	-0,02	-0,02	0,00	0	0	0	-0,02	0,00	0,00
Tamandaré	-0,02	-0,02	0,00	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Jurema	-0,02	-0,02	0,00	-1	-1	0	-0,02	-0,02	0,00
Gameleira	-0,02	0,00	0,00	0	0	0	-0,01	0,00	0,00
Lagoa dos Gatos	-0,02	-0,02	0,00	-1	0	0	-0,01	-0,01	0,00
São Jose da Coroa Grande	-0,02	0,00	0,00	0	0	0	-0,005	-0,003	-0,002
Belem de Maria	-0,02	0,00	0,00	0	0	0	-0,005	-0,005	0,000
Xexéu	-0,01	-0,01	0,00	0	0	0	-0,005	-0,005	0,000
Maraial	-0,01	-0,01	0,00	0	0	0	-0,005	-0,005	0,000
Jaqueira	0,00	0,00	0,00	0	0	0	-0,002	-0,002	0,000
Total	-322,5	-309,2	-13,5	-5.651	-5.504	-147	-170,8	-163,4	-7,4

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

A Tabela 19 mostra a distribuição do impacto econômico no cenário alternativo em cada um dos setores da matriz de Insumo-Produto em todo o território nacional. Entre os setores que apresentaram maior redução nos indicadores econômicos, podemos destacar: o setor 6 que é o da “pecuária”, o setor 58 que é o da “construção civil” e o setor 60 que é do “comércio atacadista”. Observa-se pela Tabela 14 que o setor 3 da cana de açúcar foi o setor que, em valor absoluto, teve maior redução no atendimento da demanda hídrica, no entanto, não foi o que apresentou maiores impactos econômicos tendo outros setores sofrido maiores impactos. Isso é explicado pelas diferenças entre os coeficientes técnicos de água bruta de cada setor, e das diversas elasticidades de produção como pode ser visto na equação (36) da seção 3.6. Os setores da pecuária e construção foram responsáveis por 62,9% das perdas de postos de trabalho no cenário alternativo. Para calcular o impacto nos postos de trabalho são utilizados coeficientes derivados da matriz de Insumo-Produto. Tais coeficientes foram calculados para cada região e setor econômico da matriz de Insumo-Produto dividindo-se o número de postos de trabalho pelo valor da produção.⁸¹

⁸¹ Por exemplo, para o setor econômico da “pecuária” e a região de Belo Jardim o coeficiente foi de 87,5 postos de trabalho para cada milhão de reais no valor da produção. Assim no cenário alternativo em 2012, a redução de 0,2 milhões de reais que ocorreu nessa região e nesse setor econômico implicou em uma redução de 17 postos de trabalho nessa região e setor econômico. No setor da “construção” e a região de Caruaru o coeficiente foi de 21,3 postos de trabalho para cada milhão de reais, portanto a redução de 41,4 milhões no valor da produção nessa região e nesse setor econômico implicou em uma redução de 881 postos de trabalho nessa região e setor econômico.

O setor econômico do “refino de petróleo e coquerias” (setor com número 26 na Tabela 19) sofre impacto indireto no valor da produção de 6 milhões de reais em todo o território nacional e é maior do que os 3,1 milhões de reais do impacto direto no valor da produção em todo o território nacional. A explicação para esse fato é análoga ao que foi visto na seção 4.1.2. Nesse setor não ocorre variação de alocação de água bruta e consequentemente por hipótese de modelagem da seção 4.2.1 não ocorre variação da demanda final nesse setor. Mesmo assim o produto desse setor é utilizado como insumo para a produção em setores econômicos que tiveram redução da demanda final nesse cenário como é o caso do “cultivo da cana-de-açúcar”. Portanto a demanda do setor econômico do “refino de petróleo e coquerias” é reduzida e consequentemente é reduzida a sua produção, por ser consequência da variação no valor da demanda final essa redução no valor da produção é o impacto direto do setor. Existem ainda diversos setores que utilizam o “refino de petróleo e coquerias” de forma indireta, isto é, como insumo do insumo, como é o caso do setor da “construção” e a “fabricação de adubos e fertilizantes”, que ao reduzirem sua demanda final também afetam a produção do setor de “refino de petróleo e coquerias” pelo efeito indireto, diminuindo a produção do setor.

Tabela 19: Impacto na variação do valor de produção, número de postos de trabalho e PIB em cada setor da economia no cenário alternativo.

Impactos em todo Brasil		Δ do valor da produção em milhões de reais			Δ do número de empregos em postos de trabalho			Δ do PIB em milhões de reais		
Setor econômico	Número do setor	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto	Impacto direto e indireto	Impacto direto	Impacto indireto
Cultivo de milho	1	-0,9	-0,6	-0,3	-82	-56	-26	-0,6	-0,5	-0,2
Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	2	-0,8	-0,5	-0,3	-2	-1	-1	-0,5	-0,3	-0,2
Cultivo de cana-de-açúcar	3	-8,8	-8,3	-0,5	-169	-163	-6	-6,6	-6,3	-0,3
Outros da fruticultura	4	-0,6	-0,2	-0,5	-9	-2	-7	-0,3	-0,2	-0,3
Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	5	-3,3	-1,6	-1,6	-111	-59	-53	-2,0	-0,9	-1,1
Pecuária	6	-51,5	-50,3	-1,3	-2.869	-2.806	-63	-32,5	-31,9	-0,6
Produção florestal	7	-0,8	-0,5	-0,5	-24	-11	-12	-0,6	-0,3	-0,3
Pesca e Aquicultura	8	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	9	-3,6	-2,0	-1,6	-10	-7	-3	-1,9	-1,1	-0,9
Extração de petróleo e gás natural	10	-3,8	-0,2	-3,8	-1	0	-1	-2,4	-0,2	-2,4
Abate de animais exceto pescado	11	-22,5	-22,0	-0,5	-106	-104	-2	-4,1	-3,9	0,0

Preservação do pescado e fabricação de produtos do pescado	12	-0,008	-0,005	-0,003	0	0	0	-0,002	-0,002	0,000
Laticínios e Outros produtos alimentares	13	-0,6	-0,3	-0,2	-4	-3	-1	-0,2	0,0	0,0
Fabricação e refino de açúcar	14	-0,5	-0,2	-0,3	-2	0	-1	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	15	-1,4	-0,9	-0,5	-4	-3	-1	-0,2	-0,2	0,0
Fabricação de alimentos para animais	16	-1,1	-0,8	-0,2	-4	-3	-1	-0,2	-0,2	0,0
Beneficiamento de produtos vegetais	17	-2,5	-1,9	-0,6	-11	-9	-2	-0,5	-0,3	-0,2
Fabricação de bebidas alcoólicas	18	-0,06	-0,02	-0,03	0	0	0	-0,02	0,00	-0,02
Fabricação de bebidas não alcoólicas	19	-0,05	-0,02	-0,02	0	0	0	-0,02	0,00	-0,02
Fabricação de produtos têxteis	20	-13,2	-11,9	-1,3	-164	-149	-15	-3,5	-3,1	-0,3
Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	21	-16,8	-16,8	0,0	-501	-500	-1	-7,7	-7,7	0,0
Fabricação de calçados e de artefatos de couro	22	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de produtos da madeira	23	-1,3	-0,8	-0,3	-16	-11	-5	-0,5	-0,3	-0,2
Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	24	-2,0	-0,9	-1,1	-7	-4	-3	-0,6	-0,3	-0,3
Impressão e reprodução de gravações	25	-0,8	-0,5	-0,3	-7	-4	-3	-0,3	-0,2	-0,2
Refino de petróleo e coquerias	26	-9,1	-3,1	-6,0	-1	0	0	0,3	0,2	0,3
Fabricação de álcool	27	-0,2	0,0	-0,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de biocombustíveis, exceto álcool	28	-0,2	-0,2	-0,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de adubos e fertilizantes	29	-1,7	-0,9	-0,8	-1	-1	0	-0,2	-0,2	0,0
Fabricação de produtos petroquímicos básicos	30	-0,8	0,0	-0,6	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	31	-3,5	-1,3	-2,4	-3	-1	-2	-0,6	-0,2	-0,3
Fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários	32	-0,8	-0,3	-0,5	0	0	0	-0,2	0,0	0,0
Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	33	-1,9	-1,1	-0,9	-4	-2	-2	-0,5	-0,3	-0,2
Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	34	-0,3	-0,2	-0,2	-1	-1	-1	0,0	0,0	0,0

Fabricação de produtos farmacêuticos e	35	-0,6	-0,5	-0,2	-1	-1	0	-0,3	-0,2	-0,2
Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	36	-3,6	-2,2	-1,4	-19	-12	-7	-1,1	-0,6	-0,5
Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	37	-24,5	-23,4	-1,1	-217	-209	-8	-8,3	-8,0	-0,3
Fabricação de cimento	38	-3,8	-3,0	-0,8	-21	-16	-4	-1,4	-1,1	-0,3
Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	39	-4,1	-2,2	-1,9	-4	-2	-2	-0,9	-0,5	-0,5
Metalurgia de metais não ferrosos	40	-1,1	-0,5	-0,5	-1	-1	0	-0,2	-0,2	-0,2
Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	41	-3,9	-2,7	-1,3	-30	-22	-9	-1,6	-1,1	-0,5
Fabricação de produtos eletrônicos, equipamentos de comunicação e equipamentos de informática e periféricos	42	-0,2	0,0	-0,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de equip. de medida, teste e controle, ópticos e eletro médicos	43	-0,08	-0,05	-0,03	0	0	0	-0,02	-0,02	-0,02
Fabricação de eletrodomésticos	44	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	45	-1,7	-1,1	-0,6	-6	-4	-2	-0,5	-0,3	-0,2
Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos	46	-1,1	-0,5	-0,6	-4	-2	-2	-0,3	-0,2	-0,2
Fabricação de automóveis, camionetas, utilitários e caminhões e ônibus	47	-0,1	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	48	-0,6	-0,2	-0,5	-2	0	-1	-0,2	0,0	-0,2
Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	49	-0,2	0,0	-0,2	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	50	-0,5	-0,3	-0,2	-5	-4	-1	-0,2	-0,2	0,0
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	51	-2,2	-0,9	-1,3	-17	-8	-9	-0,9	-0,3	-0,5
Geração de energia elétrica	52	-2,5	-0,9	-1,6	-1	-1	-1	-1,3	-0,5	-0,8
Transmissão de energia elétrica	53	-0,5	-0,2	-0,3	0	0	0	-0,2	-0,2	-0,2
Distribuição de energia elétrica	54	-2,2	-0,9	-1,3	-1	-1	-1	-0,8	-0,3	-0,5

Produção e distribuição de gás natural e outras utilidades	55	-0,5	-0,3	-0,2	0	0	0	-0,2	-0,2	0,0
Água e esgoto	56	-0,6	-0,2	-0,5	-2	-1	-2	-0,3	-0,2	-0,2
Resíduos	57	-0,2	-0,2	-0,2	-4	-2	-3	-0,2	0,0	-0,2
Construção	58	-89,2	-88,0	-1,3	-1.212	-1.198	-15	-41,5	-40,8	-0,6
Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	59	-0,8	-0,3	-0,5	-13	-6	-8	-0,5	-0,2	-0,3
Comércio atacadista	60	-77,6	-71,2	-6,3	-429	-395	-34	-53,7	-49,5	-4,1
Comércio varejista	61	-0,8	-0,5	-0,3	-29	-17	-11	-0,6	-0,3	-0,3
Transporte terrestre	62	-8,0	-4,4	-3,6	-88	-50	-38	-3,6	-1,9	-1,6
Transporte dutoviário de carga	63	-0,2	0,0	-0,2	0	0	0	-0,2	0,0	-0,2
Transporte aquaviário	64	-0,5	-0,2	-0,3	-1	-1	-1	-0,2	0,0	-0,2
Transporte aéreo	65	-0,6	-0,3	-0,3	-1	-1	0	-0,2	0,0	0,0
Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	66	-2,4	-0,9	-1,3	-15	-7	-8	-1,3	-0,6	-0,8
Alojamento	67	-0,3	-0,2	-0,2	-7	-5	-2	-0,2	-0,2	0,0
Alimentação	68	-0,2	0,0	-0,2	-5	-1	-4	-0,2	0,0	-0,2
Edição e edição integrada à impressão	69	-0,2	0,0	-0,2	-1	0	-1	-0,2	0,0	0,0
Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	70	-3,8	-1,4	-2,4	-10	-4	-6	-1,9	-0,8	-1,1
Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	71	-8,3	-4,2	-4,1	-19	-10	-9	-4,9	-2,5	-2,4
Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	72	-22,9	-15,6	-7,4	-160	-113	-47	-18,1	-12,4	-5,7
Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	73	-1,4	-0,6	-0,8	-11	-6	-6	-1,1	-0,5	-0,5
Educação	74	-0,3	-0,2	-0,3	-6	-2	-4	-0,3	-0,2	-0,2
Saúde	75	-0,02	-0,02	-0,02	0	0	0	-0,02	0,00	-0,02
Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	76	-0,6	-0,3	-0,3	-25	-10	-15	-0,5	-0,2	-0,2

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EM RELAÇÃO A OUTRAS MODELAGENS

A modelagem de alocação de água feita por Bhatia (2006) para o estado de Tamil Nadu na Índia, simula as alocações resultantes da utilização de instrumentos de gestão regulatórios e flexíveis⁸² usando modelos de otimização integrados a uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) para o estado. Através da integração das modelagens, pode-se separar o choque na economia do uso de diferentes estratégias de alocação em impactos diretos e indiretos. Apesar das semelhanças, a metodologia dessa tese é diferente da vista em Bhatia (2006). Primeiro, na definição de Bhatia (2006) o impacto direto são os setores da economia que são diretamente impactados pela nova alocação de água, já o impacto indireto são os outros setores afetados pela ligação intersetorial da matriz de Insumo-Produto. Essa definição é diferente da utilizada no nosso estudo, que considera como impacto direto a variação da demanda final (ΔY) e os insumos utilizados para a produção dessa demanda final ($A * \Delta Y$) ou seja, é a produção das regiões e setores econômicos utilizada para a produção da demanda final. O impacto indireto, por sua vez, é a variação da produção total menos o impacto direto.

A segunda diferença está no modelo de alocação de água utilizado. Em Bhatia (2006) o modelo utilizado para encontrar a alocação da água no cenário flexível, utiliza o “valor da água” dado pelos diferentes usuários. Nesse estudo, o modelo de alocação de água simula a estratégia adotada correntemente pelos órgãos reguladores, a de permitir o uso da água entre os diferentes usuários de acordo com o demandado nos direitos de uso (outorgas), operando os reservatórios de forma a maximizar o atendimento. A terceira diferença está na proposta de ligação entre o modelo de alocação de água e a matriz de Insumo-Produto. Em Bhatia não fica claro como ocorre essa ligação e consequentemente não pudemos reproduzi-la. A ligação proposta nessa tese foi detalhada no capítulo 3 e utilizada neste capítulo 4 em dois diferentes cenários (seção 4.1 e 4.2). Devido a essas diferenças optamos por não comparar resultados obtidos.

Llop (2013), calcula a realocação da água entre os diferentes setores econômicos a partir de uma variação da demanda final para a região da Catalunha na Espanha. Utiliza para tal uma matriz de Insumo-Produto. Conclui que ocorrendo uma variação da demanda final exógena e igual em todos os setores econômicos, o setor que mais se beneficia é a agricultura, enquanto o

⁸² O instrumento regulatório são os instrumentos comando-e-controle, com valores fixos, e se constituem nas políticas atuais de alocação da água utilizadas no estado o ano de 2020. O instrumento flexível representa instrumentos econômicos que alocam a água baseando-se no valor econômico da água entre os setores para o mesmo ano.

consumo doméstico é o mais prejudicado. Essa é uma abordagem oposta à observada na seção 3.6 desse trabalho, que calcula a variação da demanda final entre as diferentes regiões e setores econômicos, a partir de uma realocação da água entre os diferentes usuários, simulando diferentes políticas de alocação. Dessa forma, este estudo possibilita gestores a avaliar diferentes políticas públicas para a alocação de água entre os setores econômicos, dando prioridade ao abastecimento humano, ou seja, sem variação da alocação da água para o setor de água e esgoto (e consequentemente o consumo doméstico) em cada região. De fato, a prioridade à alocação de água ao setor de água e esgoto foi uma restrição utilizada nos dois cenários utilizados: referência e alternativo. É interessante observar que a metodologia proposta nesse trabalho (ver seção 3.6) pode ser adaptada e utilizada como uma metodologia alternativa a descrita em Llop (2003). Para isso pode-se utilizar como variável exógena o vetor da variação de demanda final (em cada região e setor econômico) para calcular a partir da equação (25) o vetor da variação da produção total (em cada região e setor econômico). A partir daí utilizaríamos a equação (36) para calcular o vetor da variação da alocação da água bruta⁸³ (em cada região e setor econômico).

Garrido e Henández-Mora (2013) calcularam os impactos diretos e indiretos provenientes de uma seca para a bacia do rio Ebro na Espanha para a indústria agroalimentar⁸⁴ (*agri-food*), assumindo que os efeitos negativos provocados por uma mudança na demanda final afetam o nível de produção da economia e o número de postos de trabalho via um efeito no multiplicador da produção (calculados com uma modelagem econométrica). As semelhanças entre a abordagem de Garrido e Hernández-Mora (2013) com esse estudo é a natureza do estudo de caso. Ambos os estudos tratam de uma região e um período sob um evento extremo. Ademais, o fato de ambos os estudos calcularem os impactos diretos e indiretos provenientes de uma mudança na demanda final⁸⁵. Entre as principais diferenças nos dois estudos podemos

⁸³ Deve-se observar que para essa adaptação todas as regiões e setores econômicos poderiam ter variação da alocação da água bruta sem restrição em quantidade, o que poderia implicar em uma alocação inviável (*infeasible*) na rede de nós e links vista na seção 3.4. Além disso a restrição da alocação da água em cada nó de demanda vista na equação (5) também poderia ser inviável (*infeasible*).

⁸⁴ A indústria agroalimentar consiste na elaboração e transformação de produtos alimentares com origem agrícola ao consumo humano, por exemplo, os setores da agricultura, o setor de fabricação de produtos alimentícios e o setor de fabricação de bebidas, entre outros...

⁸⁵ Em Garrido e Hernández-Mora o choque da demanda final ocorre de forma exógena, já nessa tese fazemos a escolha para cada cenário das variáveis exógenas e endógenas.

enumerar: o cálculo dos impactos diretos e indiretos que em Garrido e Hernandez-Mora utiliza uma abordagem econométrica e nessa tese é utilizada a metodologia tradicional de Insumo-Produto; o fato das características econômicas das regiões analisadas serem diferentes, no que refere-se relações interindustriais ; finalmente a modelagem de Garrido e Hernández-Mora considerar somente alguns setores da economia (setores que fazem parte da indústria agroalimentar), enquanto este estudo considera todos os setores econômicos da região

5. CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DA PESQUISA

Esse estudo desenvolveu um modelo de alocação de água entre os diferentes usuários outorgados nas bacias do Capibaribe, Ipojuca, Una e Sirinhaém, no Agreste Pernambucano. Calculou-se a alocação da água em dois diferentes cenários, simulando o uso de diferentes estratégias de operação dos reservatórios. A partir desta modelagem propôs-se uma metodologia de ligação entre a mesma e um modelo de Insumo-Produto (MIP). A ligação é realizada utilizando-se as equações da MIP, que relacionam a variação da produção com a variação da demanda final através da matriz de coeficientes técnicos. Foram adicionadas, ainda, equações relacionando a variação da produção com a variação da água bruta utilizada no processo através das elasticidades de produção deste insumo; das elasticidades de produção da água tratada; dos coeficientes técnicos da água bruta e dos coeficientes técnicos de água tratada. A ligação foi realizada em uma parceria com o Professor Doutor Marcelo Pereira da Cunha no contexto de um projeto de pesquisa financiado pela Agência Nacional de Águas, com gestão da CAPES. Tal ligação foi testada em dois cenários, tendo sido obtidos resultados que foram discutidos no capítulo anterior. Inova-se nesse trabalho ao propor e testar uma base metodológica para essa plataforma integradora de modelos que vai permitir mensurar os impactos econômicos diretos, indiretos, além do efeito transbordamento de diferentes políticas de alocação de águas. Esses impactos podem ser medidos nas diferentes regiões e setores econômicos representados na matriz de Insumo-Produto. As principais conclusões, incluindo as limitações desse estudo são apresentadas a seguir:

5.1 O MODELO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA

O modelo desenvolvido para alocar água entre os usuários da bacia identificou a solução ótima, maximizando o atendimento das demandas de água na região estudada em dois diferentes

cenários, que simularam diferentes estratégias de operação dos reservatórios. As demandas foram consideradas requerimentos fixos para os usos consuntivos em todos os meses do ano estudado, ou seja, não foram utilizadas curvas de demanda. A oferta hidrológica considerou a disponibilidade hídrica nas bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una e Sirinhaém, trecho a trecho, os volumes iniciais dos reservatórios (para o ano de 2012), a infraestrutura hídrica temporal (através da utilização dos reservatórios e seus limites de capacidade máxima e volume morto) e espacial (através do percurso dos rios, afluentes e adutoras) em todos os meses do ano estudado. O modelo aloca o recurso ao usuário através da maximização das demandas atendidas com prioridade ao setor de água e esgoto e peso igual para os outros usos considerando a disponibilidade hídrica. Dessa forma, a solução ótima do cenário referência simula a estratégia utilizada na prática pelos gestores do recurso hídrico no ano de 2012. Já a solução encontrada no cenário alternativo simula uma estratégia de operação dos reservatórios no ano de 2012 mais conservadora, impactando numa diferente alocação de água entre os usos.

As soluções em ambos os cenários mostraram que, na bacia do Una, todas as demandas foram atendidas no ano de 2012. Isto ocorreria mesmo se os reservatórios modelados na bacia tivessem 20% da capacidade atual, o que implica num potencial de oferta hidrológica para as demais bacias. De fato, foi construído em 2018 o reservatório do Serro Azul na bacia do Una e de acordo com a COMPESA⁸⁶ está atualmente em construção o Sistema Adutor de Serro Azul, que irá transportar a água desse reservatório para os municípios de Belo Jardim, Bezerros, Caruaru, Gravatá, Sanharó, Santa Cruz do Capibaribe, São Bento do Una, São Caetano, Tacaimbó e Toritama. Portanto, esse sistema será uma interligação⁸⁷ entre a bacia do Una com as bacias dos rios Capibaribe e Ipojuca. Esse reservatório tem capacidade de 303 milhões de m³, constituindo-se, atualmente, no segundo maior reservatório das quatro bacias, com capacidade apenas menor que Jucazinho, localizado na bacia do Capibaribe com capacidade máxima de 327 milhões, de m³.

⁸⁶ Fonte: <https://servicos.compesa.com.br/obras-da-adutora-de-serro-azul-avancam/>.

⁸⁷ Como pode ser visto na Tabela 21 do Apêndice A, os dez municípios estão localizados nas bacias do Capibaribe, Ipojuca e Una. Por exemplo, o município de Belo Jardim tem do seu território 37% localizada na bacia do Ipojuca e 63% localizado na bacia do Capibaribe, o município de Santa Cruz do Capibaribe tem 98% localizado na bacia do Capibaribe e 2% fora da área das quatro bacias e o município do São Bento do Una tem 91% localizado na bacia do Una e 9% da bacia do Ipojuca.

As soluções em ambos os cenários para a bacia do Sirinhaém, levaram a uma demanda não atendida de 8,3 milhões de m³. Essa bacia conta com somente um reservatório de capacidade máxima de 2 milhões de m³, e possui a maior quantidade⁸⁸ de outorgas de água bruta superficial concedidas com uma demanda total de 176,1 milhões de m³ (28,5% da demanda das quatro bacias) e como podemos ver da Figura 22 do capítulo 3, os principais usos são: agricultura (demanda de 98,8 milhões de m³), indústrias (demanda de 56,1 milhões de m³), o setor de água e esgoto (demanda de 8,9 milhões de m³), o setor de “Pecuária, Pesca e Aquicultura” (demanda de 11,7 milhões de m³) e outros (demanda de 0,6 milhões de m³).

As soluções em ambos os cenários referência e alternativo mostram que nas bacias do Ipojuca e Capibaribe os reservatórios são importantes em períodos de escassez de água. Em ambos os cenários os reservatórios foram intensamente utilizados no ano de 2012, o que reflete a sua importância em período de escassez.

O Eixo Leste do projeto de Transposição do rio São Francisco levará água do rio para o sertão e agreste de Pernambuco e prevê um ramal que fará a ligação do eixo para a bacia do Ipojuca com vazão de 8 m³/s (Castro, 2011). Além disso, está prevista a construção do sistema Adutor do Agreste de Pernambuco que é um conjunto de adutoras que irá captar água desse ramal e garantirá o abastecimento dos municípios do agreste (Asfora et al. 2017) com capacidade máxima de 7,8 m³/s. Já existem, nas bacias estudadas, sistemas de abastecimento de água⁸⁹ intermunicipais que fazem a captação da água bruta em um município de uma bacia, tratando-a e levando para o consumidor final em outra bacia⁹⁰. Portanto, a interligação entre as bacias e

⁸⁸ Na bacia do Sirinhaém foram concedidas 236 outorgas de água bruta superficial no período estudado segundo informações da APAC/ANA, já nas bacias do Una, Ipojuca e Capibaribe foram concedidas 155, 120 e 117 outorgas respectivamente.

⁸⁹ Falamos sobre os sistemas de abastecimento de água na seção 2.10.

⁹⁰ De acordo com o Atlas do Abastecimento Urbano de Água da Ana (2010) essa situação ocorre nos seguintes mananciais da área de estudo: no Sistema Prata-Camevô-Agrestina a captação ocorre no reservatório do Prata localizada na bacia do Una levando a água para os municípios de Caruaru (localizado na bacia do Ipojuca) e Agrestina (localizado na bacia do Una), no Sistema Bitury a captação ocorre nos reservatórios Belo Jardim e Bitury, além do riacho Tabocas, localizados na bacia do Ipojuca levando a água para os municípios de Cachoeirinha e São Bento do Una (localizados na bacia do Una), no Sistema Bezerras-Gravatá a captação ocorre no reservatório de Jucazinho localizado na bacia do Capibaribe levando a água para os municípios de Bezerras e Gravatá (localizados na bacia do Ipojuca), no Sistema Carpinão a captação ocorre no reservatório Cursai localizado na bacia do Capibaribe levando a água para o municípios de Tracunhaém (localizado na bacia de Goiana e fora da

o projeto de Transposição do rio São Francisco deve-se ampliar nos próximos anos, aumentando a oferta hídrica das quatro bacias abordadas nesse estudo, principalmente na região onde ocorre a maior escassez, isto é, no agreste de Pernambuco.

Essas obras de engenharia hídrica devem viabilizar e regularizar o suprimento do recurso, temporal e espacialmente, na região das quatro bacias numa estratégia de gestão de oferta, que é extremamente necessária na região, mas não suficiente. O agreste pernambucano caracterizado tanto pelo aumento da escassez quanto pelo aumento da necessidade de transferências de água, deve impor à gestão pública o desenvolvimento de políticas que tornem o uso da água mais eficiente, reduzam as perdas e priorizem os usos que contribuem para o desenvolvimento social e econômico do estado, o que caracteriza uma gestão de demanda.

O modelo de alocação de água desenvolvido na seção 3.4 simulou a estratégia atual da gestão do recurso hídrico maximizando o atendimento de todas as demandas do recurso, atendendo as restrições e hidrológicas. Esse critério de otimização hidrológico é diferente do critério de otimização econômico que aloca o recurso hídrico de acordo com o “valor” que o usuário dá ao recurso. Para obter o ótimo utilizando o critério econômico teríamos que obter as curvas de demanda para cada uso consuntivo da região.

A otimização usando critérios econômicos e ao mesmo tempo considerando restrições institucionais e ambientais, identifica as melhores formas de alocar os recursos hídricos escassos entre os setores econômicos, transferindo-os para usos que agreguem um maior valor para a sociedade, ao mesmo tempo assegurando acesso aos menos favorecidos e protegendo o meio-ambiente. Tal otimização é obtida através do uso de instrumentos econômicos adequadamente desenhados.

Incentivos econômicos podem influenciar na alocação do recurso entre os diferentes setores produtivos. Assim, setores mais intensivos em água podem ser inviabilizados diante de políticas públicas que valorem adequadamente o recurso escasso, a menos que invistam fortemente em tecnologias que aumentem a eficiência no uso. Ao mesmo tempo, setores menos intensivos em água, tais como turismo e tecnologia, podem passar a ter vantagens comparativas.

área de estudo). Como citamos acima está em construção o Sistema Adutor de Serro Azul que realizará a captação na barragem Serro Azul localizado na bacia do Una levando a água para municípios localizados na Bacia do Capibaribe e Ipojuca.

Na continuidade da pesquisa serão desenvolvidas curvas de demanda para cada uso consuntivo possibilitando que, para a mesma rede de nós e links desenvolvida no capítulo 3, o modelo baseado na rede identifique o ótimo econômico na alocação do recurso entre os diferentes usos respeitando as restrições ambientais e hidrológicas. A nova infraestrutura hídrica comentada anteriormente com a construção do Eixo Leste, ramal do Agreste e o sistema Adutor do Agreste de Pernambuco será incorporada à rede de nós e links e o período de tempo incluirá uma quantidade maior de anos (com periodicidade mensal). Ainda serão realizadas análises com anos futuros diante de cenários de mudanças climáticas.

Finalmente, deve-se ressaltar que o modelo de alocação de água desenvolvido nesse trabalho distribui o recurso hídrico conhecendo-se os valores de oferta e demanda hídrica durante todo o período estudado, ou seja, a otimização ocorre com previsão perfeita (*perfect foresight*) sobre os quantitativos de água, isto é, não existe incerteza. Pretende-se incorporar outras abordagens de otimização na continuidade de pesquisa, como a otimização estocástica, que inclui probabilidades nas ofertas hídricas.

5.2 A METODOLOGIA DE LIGAÇÃO PROPOSTA ENTRE A MODELAGEM DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA E A MATRIZ DE INSUMO-PRODUTO

Apresentou-se na seção 3.6 uma proposta metodológica de ligação entre a modelagem de alocação de água e a matriz de Insumo-Produto agregando em 75 regiões e 76 setores (e originalmente eram 149 setores diferentes). A matriz utilizada para esse estudo foi disponibilizada pelo Professor Doutor Joaquim José Martins Guilhoto numa parceria com o Professor Doutor Marcelo Pereira da Cunha no contexto do projeto de pesquisa ANA-CAPES. Para realizar essa ligação foi necessária a definição de quais variáveis são exógenas e endógenas ao modelo, o que foi feito na seção 4.1.1 e 4.2.1. Utilizando-se então o sistema de equações em (25) e (36) calcula-se a partir da variação da água bruta dada pelo modelo de alocação: a variação do valor da produção e a variação da demanda final em cada setor econômico e região da matriz de Insumo-Produto.

A metodologia foi testada nos cenários referência e alternativo e para ambos os cenários foram calculados os vetores da variação de água bruta, valor da produção e demanda final em todas as regiões e setores econômicos da matriz agregada. No cenário referência e na macrorregião das quatro bacias, no ano de 2012, a variação na alocação de água bruta foi de uma redução de 19,4 milhões de m³, o que ocasionou uma diminuição no valor da produção de 7,5 milhões de

reais e na demanda final de 7,2 milhões de reais. No mesmo ano, para o cenário alternativo e macrorregião das quatro bacias, a redução na alocação da água bruta foi de 26 milhões de m³, ocasionando uma redução no valor da produção de 322,5 milhões de reais e na demanda final de 262 milhões de reais. A diferença entre os dois cenários da alocação de água bruta é de 6,6 milhões de m³, do impacto no valor da produção é de 315 milhões de reais e de 254,8 milhões de reais no PIB, portanto a redução incremental da água bruta entre os cenários equivale a 34% da redução no cenário referência e ao mesmo tempo essa redução produz no valor da produção um impacto trinta e oito vezes maior. A explicação para isso está nas diferentes regiões e setores que foram afetados pelas reduções no atendimento nos cenários. Cada setor e região possui coeficientes técnicos e elasticidades de produção da água bruta e da água tratada diferentes. (ver equação 36 da seção 3.6). As elasticidades, que transformam a variação da água bruta na variação da produção, e os coeficientes técnicos de uso da água, de cada setor econômico e região são parâmetros muito importantes na ligação. São determinantes dos resultados econômicos do uso da água de forma diferenciada e desagregada, a partir das mudanças na alocação. Somente foi possível essa diferenciação pois utilizou-se uma matriz de Insumo-Produto inter-regional, em nível municipal com 71 regiões representando os 88 municípios das quatro bacias interligadas, e 76 setores econômicos. Não houve tempo hábil para tal, mas é fundamental que os parâmetros utilizados na ligação proposta, em especial, as elasticidades sejam submetidas a uma análise de sensibilidade para testar a robustez e a validade dos resultados obtidos através desta proposta metodológica.

A ligação entre as modelagens é resumida com o sistema de equações (38) vista na seção 3.6 que apresenta um conjunto de 11.400 equações e 17.100 variáveis⁹¹. Para encontrar uma solução precisamos determinar quais variáveis são exógenas e endógenas ao modelo. A partir da otimização, que ocorre no modelo de alocação de água desenvolvida na seção 3.4, determina-se para cada região e setor econômico, a variação de água bruta em cada cenário. Considerando o vetor de variação de água bruta como sendo de variáveis exógenas pela metodologia de ligação, caso na região e setor econômico não ocorresse variação de água bruta, então não ocorreria variação no valor da produção (equação 36 da seção 3.6). No entanto, sabendo que, muitos dos produtos desses setores e regiões são utilizados como insumos em setores e regiões,

⁹¹ As variáveis são para cada região e setor econômico: a variação da alocação da água bruta, o valor da produção e a variação do valor da demanda final, isto é, $\{\Delta AB_1^1, \Delta AB_2^1, \dots, \Delta AB_{76}^{75}, \Delta y_1^1, \Delta y_2^1, \dots, \Delta y_{76}^{75}, \Delta x_1^1, \Delta x_2^1, \dots, \Delta x_{76}^{75}\}$.

que tiveram variação da alocação de água bruta e, portanto, variação na produção, haveria mudança da demanda pelos seus insumos. Esse fato ocorreria porque o modelo de alocação de água não observa as identidades macroeconômicas presentes na matriz de Insumo-Produto. Assim, a metodologia foi definida de forma que, no caso, a região e setor econômico em que não ocorre a variação de alocação de água bruta no modelo de alocação, seja definida como variável exógena, a variação da demanda final (igual a zero). A equação (25) da seção 3.6 implica que, ocorrendo uma variação da produção das outras regiões e setores que o utilizam como insumo, tal variação será equilibrada por uma variação da produção do referido setor e região e não via demanda final. Portanto, para capturar esse efeito na metodologia de ligação proposta, definiram-se como variáveis exógenas: a variação de alocação de água bruta (ΔAB_s^r) por região e setor econômico se tal variação oriunda do modelo de alocação for diferente de zero (isto é, $\Delta AB_s^r \neq 0$); a demanda final por região e setor econômico (isto é, $\Delta y_j^k = 0$) se a variação de água bruta oriunda do modelo de alocação for igual a zero (isto é, $\Delta AB_s^r = 0$). Dessa forma, teremos uma variável exógena para cada região e setor econômico da matriz de Insumo-Produto, isto é, temos $75 * 76 = 5.700$ variáveis exógenas e todas as outras variáveis serão endógenas (portanto teremos 11.400 variáveis endógenas). Com a mesma quantidade de equações e variáveis endógenas teremos uma solução para o modelo. A metodologia de ligação e a escolha das variáveis exógenas da forma descrita é uma primeira proposta de acoplamento do modelo de alocação de água como modelo de Insumo-Produto. Na continuidade da pesquisa, podem-se fazer outras interações entre a modelagem de alocação de água e a MIP. Consideramos que a ligação, conforme proposta neste estudo, teve sucesso, pois possibilitou o cálculo de novos valores de demanda final e produção em cada setor econômico e região. Ademais, foram ainda calculados impactos diretos, indiretos e o efeito transbordamento. Com a variação da definição das variáveis exógenas e endógenas e algumas modificações, a mesma metodologia poderia ser utilizada caso o modelo de alocação obtivesse a variação da água tratada entre os usuários que a utilizam.

Em ambos os cenários referência e alternativo nesse estudo, utilizou-se no modelo de alocação de água, a prioridade ao setor de água e esgoto (isto é, o setor que transforma a água bruta na água tratada). Assim, em ambos os cenários, a demanda atendida por esse setor foi igual a demanda requerida para o ano de 2012. Segundo os dados da COMPESA, nos anos posteriores, ocorreu efetivamente uma redução de água bruta alocada para esse setor (devido a continuidade da seca na região). Havendo variação da água bruta para o setor de água e esgoto, a metodologia de ligação desenvolvida na seção 3.6 permitirá calcular os impactos econômicos nesse setor e

nas regiões e setores econômicos que a utilizam como insumo. Para a continuidade de pesquisa e com a rede de nós e links completa⁹² podemos estender os anos de simulação dos cenários e calcular os impactos oriundos da redução da água bruta alocada para o setor de água e esgoto, isto é, a redução do abastecimento dos centros urbanos. Como a MIP consegue capturar a distribuição de água tratada entre os demais setores econômicos, já que o setor de água tratada é explicitamente modelado na matriz, isto deve mensurar efetivamente os efeitos econômicos da redução de abastecimento das cidades da região.

Nos dois cenários analisados, a metodologia proposta para a ligação entre as duas modelagens se mostrou adequada para obter impactos econômicos diretos, indiretos e o efeito transbordamento nas diferentes regiões e setores econômicos representados na matriz de Insumo-Produto.

A diferença entre os dois cenários analisados representa uma mudança de estratégia de operação dos reservatórios na região das quatro bacias do Agreste (Capibaribe, Ipojuca, Una e Sirinhaém). O cenário referência é uma simulação da alocação da água entre os usos, operando os reservatórios de forma semelhante à realidade. Para isso, igualaram-se os volumes dos reservatórios no início e no final do ano de 2012⁹³. No cenário alternativo simulou-se uma situação em que a alocação decorre de uma estratégia de operação de reservatórios mais conservadora nesse mesmo ano⁹⁴.

Assim, a comparação entre os cenários deve refletir os impactos econômicos e sociais que ocorreriam na região e nos setores econômicos, caso ocorresse uma mudança na estratégia de operação dos reservatórios, mas usando ainda os mesmos instrumentos de gestão atuais, ou seja, os direitos de uso da água, que são os instrumentos de comando-e-controle. A Tabela 20 faz um resumo dos resultados econômicos e sociais mensurados na plataforma integrada nos diferentes cenários na macrorregião das quatro bacias. Enquanto no cenário referência os valores obtidos mostraram que a economia em 2012 ficou estagnada quando comparados aos valores de 2011

⁹² Incluindo os novos reservatórios, o ramal do agreste que faz parte do projeto de Transposição do Rio São Francisco e o sistema Adutor do Agreste de Pernambuco.

⁹³ Para dez dos reservatórios que temos informação do nível no início e final do ano de 2012, como explicado na seção 4.2.

⁹⁴ No cenário referência foi utilizado 166,5 milhões de m³ dos reservatórios para o atendimento da demanda dos diferentes tipos de uso no ano de 2012, já no cenário alternativo foi utilizado 83,25 milhões de m³ para o mesmo ano.

da matriz de Insumo-Produto⁹⁵, no cenário alternativo os resultados mostraram uma diminuição de 0,17% no PIB e de 0,28% nos postos de trabalho em comparação aos valores do cenário referência.

Tabela 20: Variação percentual nos cenários referência e alternativo do valor da produção, postos de trabalho e PIB na macrorregião das quatro bacias. Fonte: Elaboração própria do autor e matriz de Insumo-Produto.

Macrorregião das quatro bacias	Cenário referência	Cenário alternativo	Diferença Percentual
Valor da produção em milhões de reais	168.119	167.805	-0,187%
Número de postos de trabalho	2.011.341	2.005.890	-0,271%
PIB em milhões de reais	96.848	96.683	-0,170%

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

Como foi visto nas seções 4.1.1 e 4.1.2, o setor do “cultivo da cana-de-açúcar” foi o mais impactado economicamente no cenário referência. Esse setor teve uma redução de 18,9 milhões de m³ (97,4% da redução da água bruta em todas as regiões e setores econômicos) e o impacto no valor da produção foi de 4,068 milhões de reais (66,2% do impacto no valor da produção em todas regiões e setores econômicos). Os outros setores, por sua vez, tiveram pouca redução no atendimento da água bruta e consequentemente pouca variação no valor da produção (Tabela 6 e 11 do capítulo 4). Na verdade, neste cenário os impactos nos indicadores econômicos e sociais das regiões e setores econômicos foram em sua maioria consequência da redução da produção no setor do “cultivo da cana-de-açúcar” e na redução da demanda por seus insumos. As regiões de Ribeirão, Sirinhaém e Barra de Guabiraba localizadas na bacia do Sirinhaém e Paudalho localizado na bacia do Capibaribe são polos no cultivo da cana de açúcar e tiveram as maiores reduções no atendimento da água bruta (como pode ser visto na Tabela 7). E essas também são as regiões com as maiores reduções nos indicadores econômicos (como pode ser visto na Tabela 10). A rede de nós e links do modelo de alocação de água compreende a

⁹⁵ Já o estado de Pernambuco no mesmo período cresceu 3,9% no PIB e 5,4% nos postos de trabalho. Fonte: IBGE e Agência CONDEPE/FIDEM/DEPE/DEPS/GEEC/Contas Regionais. Os valores podem ser encontrados em <http://www.anuario.pe.gov.br/categoria/contas-regionais>. Fonte: série histórica do IBGE de pessoas ocupadas em Pernambuco. Os valores podem ser encontrados em: <https://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=7&op=0&vcodigo=PD165&t=populacao-10-anos-mais-idade-ocupada>.

macrorregião das quatro bacias e não incorpora alocação da água bruta fora dessa região. Mesmo assim, como consequência da redução de produção na macrorregião das quatro bacias uma quantidade menor dos insumos foi utilizada nessa região e, portanto, levou a uma redução na produção dos setores que fornecem o insumo. Como parte desses insumos vem das regiões do resto de Pernambuco, resto do Nordeste e resto do Brasil, houve consequentemente uma redução nos indicadores econômicos e sociais.

Diferentemente do cenário referência, no cenário alternativo uma quantidade maior de setores é afetada de forma importante pela redução na alocação de água bruta, como pôde-se ver na seção 4.2.1. Apesar do cultivo da cana-de-açúcar ser ainda o setor com maior redução no atendimento da água bruta (24,1 milhões de m³, o que representa 92,6% da redução em todas as regiões e setores econômicos), outros setores também sofreram reduções significativas proporcionalmente no atendimento a demandas requeridas, como por exemplo os setores da pecuária e construção civil. Como pôde-se ver na Tabela 19 da seção 4.2.2, num cenário mais conservador no uso dos reservatórios, tais setores foram os mais impactados nos indicadores econômicos e sociais. Esse impacto foi explicado não só pela redução no atendimento a suas demandas da água bruta (e a multiplicação dos coeficientes da água bruta e elasticidade por região e setor econômico, equação 36 da seção 3.6), mas também pela ligação intersetorial entre as regiões e setores econômicos.

Um resultado extremamente interessante e importante de ressaltar no cenário alternativo, ou seja, no cenário que impõe maiores restrições de água aos demandantes, foi o conjunto de impactos econômicos e sociais na região de Caruaru⁹⁶. Neste cenário, essa região teve uma grande redução na produção, correspondendo a 58,9% do impacto total no valor da produção da macrorregião inteira, ou seja, da região das quatro bacias interligadas. No entanto, em relação a redução de água total imposta às 4 bacias, a redução de Caruaru representou apenas 1,3% da redução no atendimento de todas as demandas da macrorregião.

Para explicar o impacto econômico tão significativo nessa região, mesmo com uma pequena redução no atendimento das demandas por água bruta, deve-se atentar para os setores

⁹⁶ Deve-se ressaltar que não estão considerados nessa região de Caruaru os setores econômicos atendidos pelo setor de água e esgotos, ou seja, os setores econômicos dentro das áreas urbanas. Isso porque colocou-se como prioridade nos dois cenários o abastecimento humano e, portanto, não houve reduções no atendimento desses setores. Caso houvesse reduções no atendimento ao abastecimento humano na região com impactos nestes setores econômicos das áreas urbanas, os impactos provavelmente ainda seriam maiores.

econômicos demandantes da água da região em que ocorreram as maiores variações do valor da produção, devido a reduções na alocação de água bruta, a saber: “construção” (34,2% do impacto total no valor da produção da região), “comércio atacadista” (33,7%), “fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos” (9,2%) e “confeção de artefatos do vestuário e acessórios” (8,7%). Comparando-se tais setores com o setor mais intensivo em água de todas as 4 bacias (“cultivo da cana-de-açúcar” em que reduziu-se 92,6% da variação da água bruta na macrorregião), conclui-se que os mesmos levam a bem maiores variações na produção devido a bem menores variações de água bruta.

Fica claro nesse resultado o efeito de uma otimização não-econômica, ou seja, os efeitos do “critério do engenheiro” nas decisões de alocação, que tenta maximizar o atendimento de todas as demandas diante da disponibilidade hídrica existente. As reduções na alocação feitas sem considerar os efeitos econômicos levam a impossibilidade de diferenciar, diante da escassez, os usuários e setores mais ou menos eficientes no uso da água. Isto deve levar a maiores perdas econômicas e sociais de tal “critério do engenheiro” em relação a critérios econômicos. Ademais alocações assim, passam incentivos inadequados aos setores e agentes usuários da água. Em regiões escassas em água e com necessidades de transferências crescentes, como é o caso da nossa área de estudo, sinais e incentivos adequados, através de instrumentos de gestão fundamentados na teoria econômica, devem ser condição essencial para promover um desenvolvimento sustentável.

A diferença entre os cenários referência e alternativo, em termos de gestão, foi a operação dos reservatórios no ano de 2012. No cenário alternativo essa utilização foi mais conservadora e utilizou uma quantidade menor dos estoques dos reservatórios⁹⁷ impondo assim maiores reduções no atendimento às demandas, durante este ano que foi o primeiro da seca. Consequentemente era de se esperar, que os impactos econômicos e sociais negativos no ano fossem maiores no cenário alternativo do que no cenário referência. Os impactos negativos no cenário alternativo foram de 437,5 milhões de reais a menos no valor da produção, perda de 6,3 mil postos de trabalho e redução de 207,5 milhões de reais no PIB em relação ao cenário referência. Estes resultados mostraram um *trade-off* para o gestor durante o ano em questão, em relação ao uso dos reservatórios. Por um lado, o gestor ao utilizar uma quantidade maior de suas reservas no ano estudado consegue reduzir os impactos negativos associados a estiagem

⁹⁷ Ao final do ano de 2012 foram utilizados 166,5 milhões de m³ dos reservatórios no cenário referência e 83,2 milhões de m³ no cenário alternativo.

nesse mesmo período (cenário referência), mas fica sem reservas para os anos seguintes. Caso a seca persista, como foi o caso, os impactos econômicos e sociais podem até ser maiores durante o período futuro. Por outro lado, ao utilizar uma quantidade menor dos estoques, aumenta os impactos negativos no ano em questão (cenário alternativo), mas pode reduzi-las nos períodos futuros. Por isso, apesar de termos feito a aplicação para um ano apenas, devido a limitações de tempo, recomenda-se que o modelo alocação seja rodado para um período maior de anos, com o mesmo passo mensal. De preferência, o período de tempo estudado deve ser compatível com os tempos de regularização dos reservatórios modelados. Na verdade, dessa forma, com maior número de anos poderia se calcular um *trade-off* explícito para ambos os cenários referência e alternativo, o que se pretende realizar na continuidade de pesquisa.

Em ambos os cenários há restrições impostas com relação ao início e fim do ano de 2012 para os níveis dos reservatórios. A restrição no caso do cenário referência é que esses níveis igualem aos valores observados no início e fim do ano de 2012 e no cenário alternativo é que esses níveis igualem ao valor observado apenas no início do ano de 2012. As figuras abaixo apresentam dados dos reservatórios de Jucazinho e Prata. Esses são os dois maiores reservatórios na região das quatro bacias, estando localizados nas bacias do Capibaribe e Una respectivamente. As figuras 45 e 46 mostram os níveis de ambos os reservatórios mês a mês para o cenário referência. Como pode-se ver no cenário referência em ambos os reservatórios o valor observado mostra uma depleção mais suave do que o ocorrido na solução do modelo de alocação. As figuras 47 e 48 mostram os níveis de ambos os reservatórios mês a mês para o cenário alternativo. Essa diferença em ambos os cenários pode gerar distorções das demandas atendidas pelos diferentes usuários do recurso hídrico e, portanto, podem implicar em distorções nos resultados obtidos para os impactos econômicos e sociais. Por outro lado, esse grau de liberdade ao modelo de alocação de água permitiu que a restrição de prioridade ao abastecimento público seja factível, permitindo ao gestor a aplicação de políticas de gestão do recurso hídrico e a priorização ao abastecimento público, servindo ainda como medida para avaliar o quanto o modelo de alocação de água representa a realidade. Algumas restrições na modelagem podem diminuir essa diferença e foram registrados na próxima seção, sugeridas na continuidade da pesquisa.

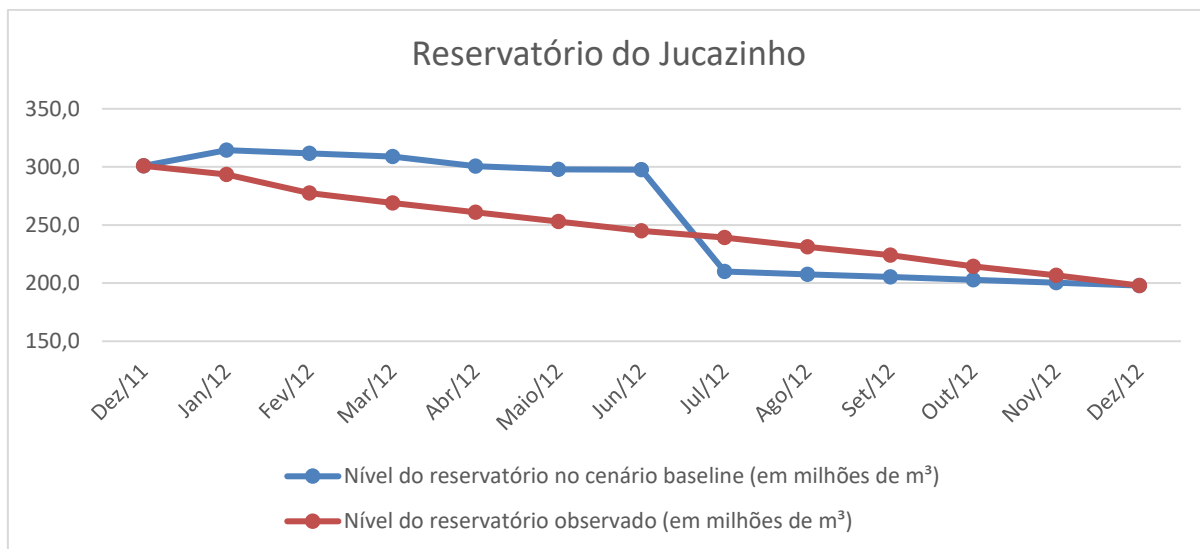


Figura 45: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário referência do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m³. Fonte: ANA e elaboração própria do autor.

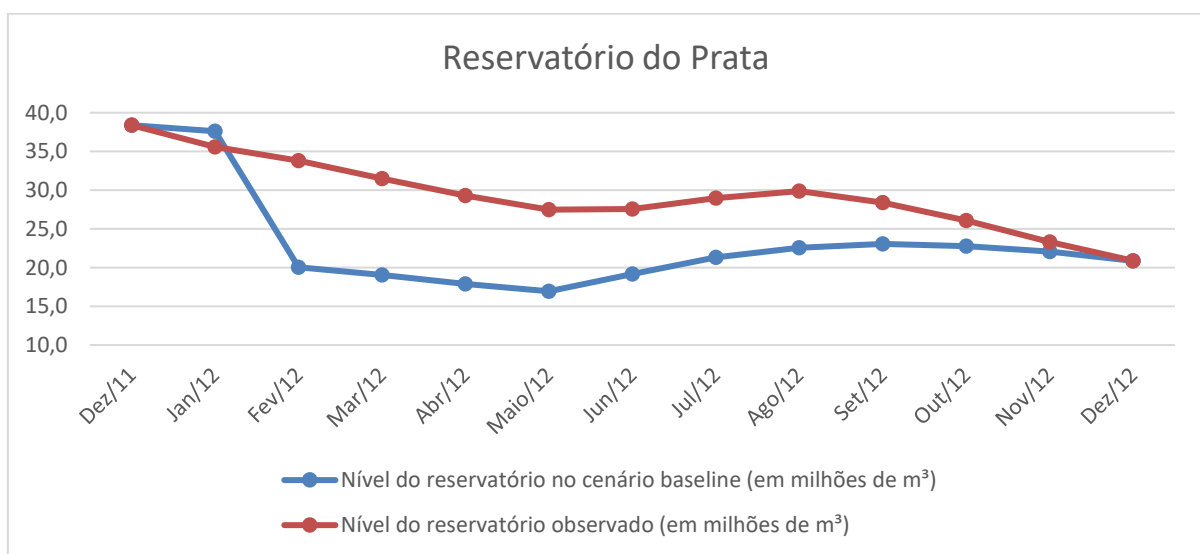


Figura 46: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário referência do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m³. Fonte: ANA e elaboração própria do autor.

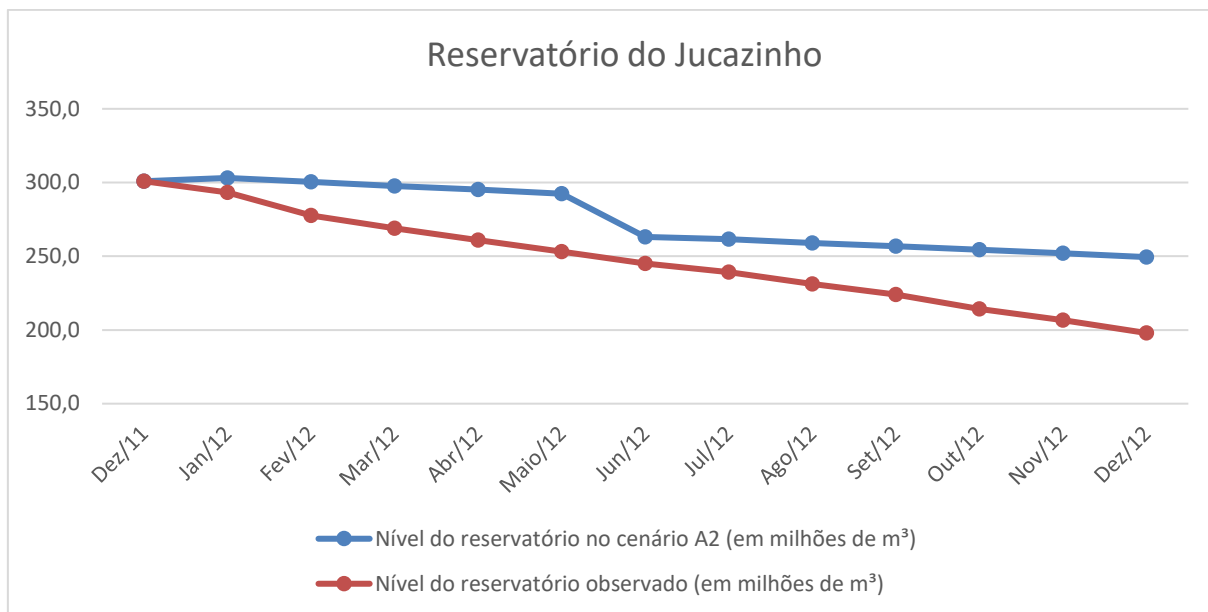


Figura 47: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário alternativo do nível do reservatório do Jucazinho em milhões de m³. Fonte: ANA e elaboração própria do autor.

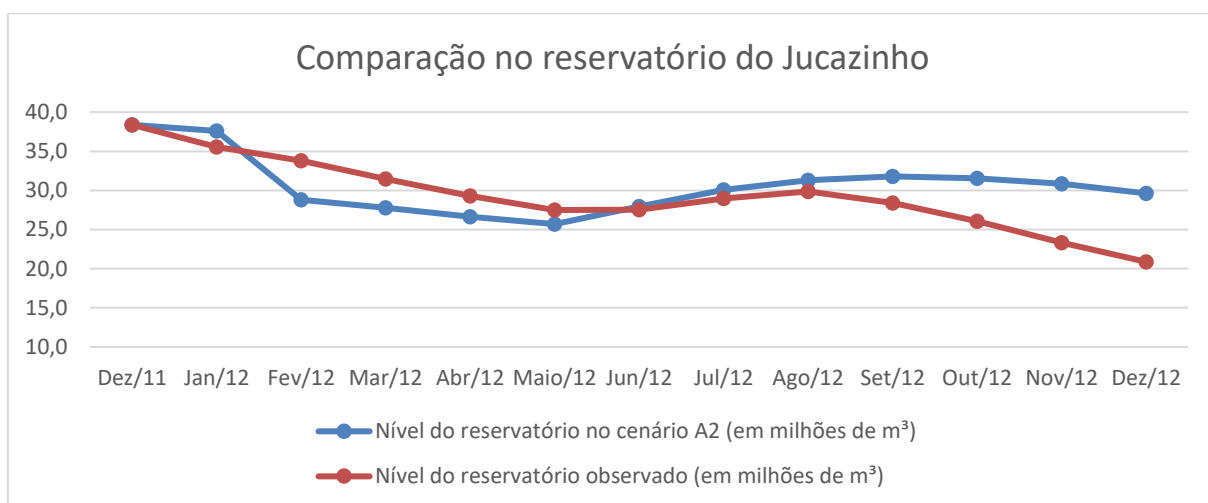


Figura 48: Comparação mês a mês entre o valor observado e o cenário alternativo do nível do reservatório do Prata em milhões de m³. Fonte: ANA e elaboração própria do autor.

Por fim, deve-se registrar que existem setores econômicos que utilizam a água tratada como insumo no processo produtivo, complementando a água bruta ou exclusivamente. Da forma como obtemos os resultados aqui descritos, a água tratada é um produto do setor de água e esgoto e, como tal, apenas variaria caso houvesse redução na alocação bruta deste setor. Como simulamos a prioridade no abastecimento humano, não houve a redução na água bruta do

mesmo como insumo e, portanto, não houve variação na água tratada. Assim ao ampliar o número de anos da série deverá haver redução na água tratada, o que deve aproximar a solução à encontrada na realidade.

A matriz de Insumo-Produto utilizada nesse trabalho foi agregada em nível municipal e, portanto, considerou as informações representativas deste nível de agregação. Como existem municípios cujos limites administrativos não estão totalmente inseridos nas bacias estudadas (um exemplo é Recife que têm apenas 30% de seu território na bacia do Capibaribe e 70% em outras bacias fora da macrorregião), a variação da alocação da água bruta nesses municípios ocorre apenas para os usuários desta região atendidos pela bacia do Capibaribe. Mesmo assim, como vimos na seção 3.2 com as informações disponibilizadas pela APAC, ANA, FUNARBE e COMPESA obtemos o quantitativo de água bruta (total) utilizada para cada região e setor econômico da macrorregião das quatro bacias, que foi inserida na linha do fator primário da MIP e não apenas o quantitativo que se aloca. Assim para calcular as elasticidades e coeficientes de água bruta (visto na seção 3.6), foram utilizados os quantitativos totais das regiões e setores econômicos, com alguma parte de seu território na área de estudo(as 4 bacias). No caso de ocorrer uma variação da água bruta na região fora da área desse estudo e consequentemente variação na sua produção, essa variação não seria observada pela ligação entre as modelagens. Essa é uma limitação que pode ser corrigida caso a matriz de Insumo-Produto utilizada desagregasse os municípios em nível de bacias ou com a inclusão na área de estudo das bacias adjacentes.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DE PESQUISA

A proposta metodológica e os resultados obtidos nesse trabalho pretendem ser um ponto de partida para obtenção de uma plataforma integradora que possa subsidiar a política de alocação de águas em bacias complexas e interligadas como as da nossa área de estudo. A metodologia mostrada na seção 3.6 de ligação entre o modelo de alocação de água e a matriz de Insumo-Produto pode ser estendida na mesma área de estudo, bem como aplicada em outras regiões e com diferentes agregações da MIP. A continuidade dessa pesquisa envolve um grupo interdisciplinar e um projeto financiado pela ANA-CAPES, sendo os principais pontos descritos a seguir:

1. Identificar as curvas de demandas usando programação matemática para os diferentes usos da água do modelo de alocação já desenvolvido e identificar o ótimo econômico da alocação da água.

2. Desenvolver um modelo de programação linear a partir da MIP, respeitando as restrições dadas pela rede de nós e links de forma a obter o ótimo de acordo com critérios econômicos, outros tais como: maximização do PIB, do número de postos de trabalho ou do valor da produção.
3. Inserir outras restrições físicas no modelo de alocação tais como: inclusão da vazão máxima das tomadas de água dos reservatórios, taxas de evaporação dos reservatórios e curvas de cota-área-volume.
4. Inserir na modelagem de alocação de água a questão da qualidade da água de forma integrada que impacta diretamente sobre a disponibilidade.
5. Incluir toda a nova infraestrutura hídrica na rede de nós e links, tais como o reservatório de Serro Azul, a Adutora do Agreste e outras.
6. Inclusão de cenários climáticos futuros (disponibilidades hídricas futuras) no modelo de alocação e cálculo a partir da metodologia de ligação dos os impactos econômicos e sociais de diferentes estratégias de alocação. Dessa forma poderá ser subsidiado os desenhos e a aplicação de políticas de gestão através dos instrumentos regulatórios e econômicos no curto, médio e longo prazo.
7. Inclusão da análise do efeito renda (efeito induzido) ao cálculo do impacto nos indicadores sociais e econômicos resultante da modelagem de ligação. Para isso será necessária a construção de uma Matriz de Contabilidade Social.
8. Fazer uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros utilizados na metodologia de ligação proposta neste estudo para testar a robustez dos modelos e a confiabilidade dos resultados. Os principais parâmetros são as elasticidades de água bruta e água tratada, coeficientes de água bruta e tratada e o share da água tratada para cada região e setor econômico.
9. Aumentar a série de anos no modelo de alocação para além de 2012. Dessa forma, os impactos sociais e econômicos utilizando a metodologia de ligação poderá avaliar a gestão em períodos maiores.
10. Estudar os valores marginais do modelo de otimização em relação às principais restrições ativas, tais como: preços sombras e custos de oportunidade. Os mesmos devem auxiliar no subsídio ao desenho de instrumentos econômicos de gestão, tais como valores de cobrança, taxas de efluentes, etc.

11. Estender a metodologia de ligação de forma a incorporar um Modelo de Equilíbrio Geral Computável (MEGC) e possibilitar a obtenção de preços relativos entre os produtos devido a choques de alocação de água bruta na economia.

O Brasil, especialmente a região Nordeste e o estado de Pernambuco - com investimentos consideráveis em infraestrutura de engenharia já feita - como canais, adutoras, estações de bombeamento e reservatórios – e outros ainda em andamento - devem beneficiar-se da definição de políticas públicas que aumentem a eficiência do uso da água. O crescente conhecimento de metodologias, modelos e sistemas automatizados que possam apoiar a definição dessas políticas, poderá viabilizar a definição e o uso daquelas que na prática, incentivem a eficiência econômica e evitem os conflitos decorrentes do uso de abordagens exclusivamente orientadas a oferta. Esse trabalho, ao desenvolver e aplicar uma proposta metodológica de integração de um modelo de alocação baseado em rede com um modelo *economy-wide*, como o de Insumo-Produto, pretende dar uma contribuição importante nessa direção.

REFERÊNCIAS

ABOLPOUR, B.; JAVAN, M.; KARAMOUZ, M. Water allocation improvement in river basin using adaptive neural fuzzy reinforcement learning approach. **Appl. Soft Comput.**, [s.n.], v. 2, p. 265–285, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. RELATÓRIO da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica. **Agência Nacional de Águas**, 2017. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguasdo-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica>. Acessado em: 10/07/2019.

ALCÁNTARA, V.; PADILLA, E. Input–output subsystems and pollution: an application to the service sector and CO2 emissions in Spain. **Ecological Economy**, v. 68, p. 905–914, 2009.

ALCOFORADO DE MORAES,. O Agreste empreendedor e a gestão de demanda. **Diário de Pernambuco**, p. Disponível em: http://www.diariodepernambuco.com.br/app/noticia/politica/2017/11/23/interna_politica,731866/marcia-m-g-alcoforado-de-moraes-o-agreste-empreendedor-e-a-gestao-d.shtml, 2017.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. Sistema de Apoio a Decisão para priorização de Sistemas de Informação. **Dissertação de Mestrado**, Recife: [s.n.], 1997.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. Modelo Econômico-Hidrológico Integrado para alocação ótima de água em diferentes usos e vinhoto em áreas plantadas de cana na bacia do rio Pirapama. **Tese (Doutorado) - UFPE**, Recife, Julho 2003.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. SSD espacial para la gestión óptima de sistemas de recursos hídricos incorporando modelos hidroeconómicos. **In: SOLERA, B. S., et al. Aplicaciones de Sistemas Soporte a la Decisión en Planificación y Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas.**, Barcelona: [s.n.], 2013.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. et al. Joint Water Quantity-Quality Management in a Biofuel Production Area - An Integrated Economic-Hydrologic Modeling Analysis. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, p. 502-511, 2010.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. et al. Integrated economic models to support decisions on water pricing in biofuel production river basins: three case studies from Brazil. **Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr** , v. 10, [s.n.], 2015.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. **Integração de modelos econômicos para apoio à decisão em políticas de alocação de águas**. Chamada Capes/ANA - Pró-Recursos Hídricos. [S.l.], p. Edital 16/2017.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G.; CUNHA, M. P. D.; ET. AL. Integração de modelos econômicos para apoio à decisão em políticas de alocação de águas. **Situação: Em andamento; Natureza: Pesquisa. 2018.**

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G.; MARQUES, G. F. A Economia da Alocação de Água. **Relatório técnico final de consultoria ao Banco Mundial**, [s.n.], 2012.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G.; RINGLER, C.; CAI, X. Policies and instruments affecting water use for bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 5, p. 431-444, 2011.

ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G.; SAMPAIO, Y.; CIRILO, J. A. Integração de componentes econômicos e hidrológicos na modelagem de alocação ótima de água para apoio a gestão de recursos hídricos: Uma aplicação na bacia do Rio Pirapama. **Revista Economia**, v. 7(2), p. 341–364, 2006.

ALEMU, E. T. et al. Decision Support System for Optimizing Reservoir Operations Using Ensemble Streamflow Predictions. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, January/February**, 2011. 72-82.

ANA. Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água, Disponível em <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/>. Acessado em 10 de novembro de 2019. 2010.

ANA. Conjuntura dos recursos hídricos. **Informe ANA**, Brasília: 177 p, 2017.

ANA. Conjuntura dos recursos hídricos. **Informe ANA**, Brasília: 88 p, 2018.

ANA. POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Agência Nacional de Águas.**, 2019. Disponível em <https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>, acessado em 10/08/2019.

ASFORA, M. C.; LIMA, M. S.; LACERDA, M. R. S. Diagnóstico da seca 2011-2016 em Pernambuco: impactos e políticas de mitigação.. **Parcerias Estratégicas** , v. 22, 2017. 247-273.

ASSIS, A. A. A. et al. **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - ABAS**. Bonito – MS: [s.n.]. 2012.

BAGATIN, R. et al. Conservation and improvements in water resource management: a global challenge. **J. Clean. Prod.** 77, 1e9., 2014.

BEAR, J.; LEVIN, O. The Optimal Yield of an Aquifer. **Haifa Symposium. International Association of Hydrological Sciences**, Haifa, 1967. 401–412.

BEKCHANOV, M. et al. Integrating input-output modeling with multi-criteria analysis to assess options for sustainable economic transformation: The case of Uzbekistan. **Springer**, Dordecht, Netherlands, 2014. 229–245.

BEKCHANOV, M. et al. Systematic Review of WaterEconomy Modeling Applications. **J. Water Resour. Plan. Manage.**, 143(8), 2017. 1-18.

BHATIA, R. et al. Water in the Economy of Tamil Nadu :More flexible water allocation policies offer a possible way out of water-induced economic stagnation, and will be good for the environment and the poor. **Water Policy**, v. 8, [s.n.], 2006.

BHATIA, R. et al. Indirect economic impacts of dams: case studies from India, Egypt, and Brazil. **World Bank**, Washington, 2008.

BHATIA, R.; CESSTI, R.; WINPENNY, J. Water Conservation and Reallocation: Best Practices. **The World Bank**, Washington: [s.n.], 1995.

BIGATON, A. et al. Comportamento dos preços dos insumos agrícolas da cana-de-açúcar: safra 2016/17. **Revista IPecege**, n. 3(4), p. 66-70, 2017.

BLANCO, C. D. P.; THALER, T. An Input-Output Assessment of Water Productivity in the Castile and León Region (Spain). **Water**, v. 6, p. 929-944, 2014.

BOELEEE, E.; CHIRAMBA, T.; KHAKA, E. An Ecosystem Services Approach to Water and Food Security. **UNEP/International Water Management Institute (IWMI)**, Nairobi/Colombo: [s.n.], 2011.

BOUDHAR, A.; BOUDHAR, S.; IBOURK, A. An input–output framework for analysing relationships between economic sectors and water use and intersectoral water relationships in Morocco. **Journal of Economic Structures**, v. 6, p. 1–25, 2017.

- BOURBLANC, M. Social participation in water governance and management: critical and global perspectives. **International Journal of Water Resources Development**, v. 26, p. 709–713, 2010.
- BRENE, P. R. A. et al. Estimativa da matriz de insumo-produto do município de São Bento do Sul no estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, p. 1-16, 2011.
- BROOKS, D. B. Water: Local-Level Management. **International Development Research Centre**, Ottawa: [s.n.], 2002.
- BROOKS, D. B. An Operational definition of water demand management. **International Journal of Water Resources Development**, v. 22 (4), p. 521-528, 2006.
- BROOKS, D.; BRANDES, O. M. Why a water soft path, why not and what then? **International Journal of Water Resources Development**, v. 27, p. 315-344, 2011.
- BURT, O. R. Optimal Resource Use over Time with an Application to Groundwater. **Management Science**, v. 11, p. 80-93, 1964.
- CAMARGO, F. et al. O Turismo E a Economia Brasileira: Uma Discussão Da Matriz De Insumo-Produto (Tourism and the Brazilian Economy: A Discussion About the Input-Output Matrix. **14º Congresso da APDR**, Tomar, Portugal, 2008.
- CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Estudos Avançados**, v. 28, n.82, p. 65-88, 2014.
- CARRERA-FERNANDEZ, J. Estudo de cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama. **Casa Forte**, Recife: [s.n.], 1999.
- CASTRO, C. N. D. Transposição do Rio São Francisco: análise de oportunidade do projeto. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.**, 2011. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1418/1/TD_1577.pdf. Acessado em: 01/08/2019.
- CONNOR, R. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. **UNESCO Publishing: Paris, France**, 2015.

- CROMPTON, J. Measuring the Economic Impact of Visitors to Sports Tournaments and Special Events. **National Recreation and Park Association, Research Series.**, Ashburn: [s.n.], 1999.
- CUMBERLAND, J. H. A Regional Interindustry Model for the Analysis of Development Objectives. **Regional Science Association Papers**, v. 16, p. 69-94, 1966.
- CZAMANSKI, S.; MALIZIA, E. E. Applicability and limitations in the use of national input–output tables for regional studies. **Regional Science Association Papers**, v. 23, p. 65–77, 1969.
- DAI, T.; LABADIE, J. W. River basin network model for integrated water quantity/quality management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, p. 295–305, 2001.
- DALY, H. E. On Economics of a Life Science. **Journal of Political Economy**, v. 76, p. 392-407, 1968.
- DANTIZG, G. B. Maximization of a Linear Function of Variables Subject to Linear Inequalities. **Activity Analysis of Production and Allocation, John Wiley & Sons**, New York, p. 339-347, 1951.
- DA-PING, X.; HONG-YU, G.; DAN, H. Discussion on the Demand Management of Water Resources. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, p. 1173–1176, 2011.
- DE FIGUEIREDO, M. G. et al. Matriz insumo-produto de Mato Grosso 2007: construção e análise dos principais indicadores econômicos. **Revista de Estudos Sociais**, v. 13, p. 49–73, 2014.
- DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. Secas no Brasil: política e gestão proativas. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE; Banco Mundial**, Brasília: 292 p., 2016.
- DI NARDO, A. et al. Applications of graph spectral techniques to water distribution network management. **Water**, v. 10, p. 45, 2018.
- DI NARDO, A. et al. Applications of graph spectral techniques to water distribution network management, [s.n.], v. 10, 2018.
- DIETZENBACHER, E.; VELÁZQUEZ, E. Analysing Andalusian virtual water trade in an input–output framework. **Regional studies** 41(2), 2007. 185–196.

DINAR, A.; ROSENGRANT, M. W.; MEINZEN-DICK, R. Water allocation mechanisms – principles and examples. **World Bank. (Policy, Research Working Paper, 1779).**, Washington: [s.n.], 1997.

DIXON, P. B.; RIMMER, M. T.; WITTEWER, G. Saving the Southern Murray-Darling basin: The economic effects of a buyback of irrigation water. **Econ. Rec.**, v. 87(276), p. 153–168, 2011.

DRAPER, A. J. Economic engineering optimization for California water management. **Journal of Water Resources Planning and Management** , v. 129, p. 155–164, 2003.

FIGUEIREDO, L. E. N. A demanda da água para irrigação: uma aplicação da programação matemática positiva para os perímetros irrigados do submédio do Rio São Francisco. **Dissertation, Federal University of Pernambuco, Recife: [s.n.]**, Pernambuco, Brasil, 2015.

FLINT, R. W. The sustainable Development of Water resources. **Water Resources Update**, v. 127, p. 48-59, 2004.

FREITAS, M.; LOPES, A. A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras. **Revista Latinoamerica de Gestão de Aguas - REGA**, v. 4, p. 5-28, 2007.

FUNARBE. Desenvolvimento da Matriz de Coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil. **Fundação de Apoio à Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa, 2011.

GALLAGHER, L. et al. Embracing risk, uncertainty and water allocation reform when planning for green growth. **Aquatic Procedia**, v. 6, p. 23–29, 2016.

GELAIN, J. G.; ISTAKE, M. Exportação líquida de água virtual brasileira e estadual. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 9, n. 2, p. 150-168, 2015.

GIACOMELLI SOBRINHO, V. "Cradle-to-grave" sustainability: extension of input-output models to municipal Solid Wastes and to corporate social and environmental responsibility in the retail sector. **Ambiente & Sociedade** , v. 16, p. 21-40, 2013.

GIL, M.; GARRIDO, A.; HERNÁNDEZ-MORA, N. Direct and indirect economic impacts of drought in the agri-food sector in the Ebro River basin (Spain). **Nature Hazards and Earth System Sciences**, n. 13, p. 2679–2694, 2013.

- GISSER, M.; MERCADO, A. Integration of the Agricultural Demand Function For Water and the Hydrologic Model for the Pecos Basin. **Water Resources Research**, v. 8, p. 1373-1384, 1972.
- GISSER, M.; MERCADO, A. Economic Aspects of Groundwater Resources and Replacement Flows in Semi-Arid and Agricultural Areas. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 55, p. 461-466, 1973.
- GOMES, J. L.; BARBIERI, J. C. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 2, n. 3, p. 1-21, 2004.
- GRIFFIN, R. C. Water Resource Economics, the Analysis of Scarcity. **Policies and Projects. Cambridge: MIT Press.**, [s.n.], 2006.
- GUILHOTO, J. et al. Matriz de Insumo-Produto do Nordeste e Estados: Metodologia e Resultados (Input-Output Matrix of the Brazilian Northeast Region: Methodology and Results). **Banco do Nordeste do Brasil**, [s.n.], 2010.
- GUILHOTO, J. J. M. **Análise de Insumo-Produto: Teoria e Fundamentos.** Livro em Elaboração. Departamento de Economia. Versão Revisada. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- GUILHOTO, J. J. M. et al. Construção da Matriz Inter-regional de Insumo-produto para o Brasil: Uma aplicação do TUPI. **NEREUS**, [s.n.], 2017.
- HAROU, J. J. et al. Hydro-economic models: concepts, design, applications and future prospects. **Journal of Hydrology**, v. 375, p. 627-643, 2009.
- HENDERSON, J. L.; LORD, W. B. A gaming evaluation of colorado rwer drought management institutional options. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 31, p. 907–924, 1995.
- HOWITT, R. E. Positive mathematical programming. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 77(2), p. 329–342, 1995.
- HUBACEK, K. et al. Assessing regional and global water footprints for the UK. **Ecological Economics**, v. 69, p. 1140-1147, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Mapa do Semiárido Brasileiro., 2017. Disponível em: Acesso em dez. 2018.

- JENSEN, R. C.; MANDEVILLE, T. D.; KARUNARATNE, N. D. Regional Economic Planning: Generation of Regional Input–Output Analysis. **Croom Helm Ltd**, London: [s.n.], 1979.
- JONKMAN, S. N. et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. **Ecological Economics**, v. 66 (1), p. 77–90, 2008.
- KAISER, I. M. Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos. **Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.**, São Carlos: [s.n.], 2006.
- KALLUF, S. N.; KURESKI, R. Modelo insumo-produto: uma aplicação para a Economia Paranaense. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, [s.n.], 2015.
- KAMPAGOU, E.; LEKKAS, D. F.; ASSIMACOPOULOS, D. Water demand management: implementation principles and indicative case studies. **Water and Environment Journal**, v. 25(4), p. 466–476, 2010.
- KE, W. L. et al. A multi-objective input-output linear model for water supply, economic growth and environmental planning in resource-based cities. **Sustainability**, v. 8 (2), p. 160, 2016.
- KELMAN, J.; FRAJTAG, D. K. Agências Reguladoras. **Boletim da Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH**, [s.n.], n. 3, nov 2000.
- KELMAN, J.; KELMAN, R. Alocação de água para produção econômica em região semi-árida. [S.l.]: COPPE/UFRJ, Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais., 2001. Cap. 4, p. 125-143.
- KOECH, R. K.; SMITH, R. J.; GILLIES, M. H. Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. **Agricultural Water Management.**, v. 142, p. 77–87, 2014.
- LAKSHMANAN, T. The broader economic consequences of transport infrastructure investments. **Journal of Transport Geography**, v. 19(1), p. 1–12, 2011.
- LANNA, A. E. Modelos de Gerenciamento das Águas.. **A Água em Revista, CPRM**, 1997.
- LEONTIEF, W. Die wirtschaft als Kreislauf. Arch. **Sozialwissenschaft Soz**, v. 60, p. 577–623, 1928.

LEONTIEF, W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. **The Review of Economics and Statistics**, v. 18, p. 105–125, 1936.

LEONTIEF, W. Environmental repercussions and the economic structure: an input–output approach. **Review of Economics and Statistics**, v. 52, p. 262–271, 1970.

LLOP, M. Economic impact of alternative water policy scenarios in the Spanish production system: an input–output analysis. **Ecological Economics**, n. 68, p. 288–294, 2008.

LLOP, M. Water reallocation in the input–output model. **Ecological Economics**, n. 86, p. 21–27, 2013.

LOFTING, E. M.; MCGAUHE, P. H. Economic evaluation of water: an input–output and leaner programming analysis of California water requirements. **Water Resources Center**, University of California, Berkeley, v. 116, p. 512.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. Water Resource Systems Modeling: Its Role in Planning and Management. **Water Resource Systems Planning and Management**. Springer, [s.n.], 2017.

LUCAS, R. The Phillips Curve and Labor Markets. **American Elsevier**, New York, v. 1, p. 19–46, 1976.

MAASS, A. et al. Design of Water-Resource Systems, Cambridge. **Harvard University Press**, 620 p., 1962.

MACHADO, C. Water resources and citizenship in Brazil: limitations, alternatives and challenges. **Ambient. Soc.**, v. 6, n. 2, p. 121-136, 2003.

MALIK, R. P. S. Growth Impacts of Development And Management of Water Resources, Proceedings, Annual Partners' Meet. **IWMI-TATA Water Policy Program**, Hyderabad, India: [s.n.], 2008.

MARTINS, E. S. et al. Climate change impacts on water resources management : adaptation challenges and opportunities in Northeast Brazil. In: The World Bank Group. **Latin America and Caribbean Region Environment and Water Resources occasional paper series. v. 1**, Washington D.C., 2013.

MAYER, A.; MUÑOZ-HERNANDEZ, A. Integrated Water Resources Optimization Models: An Assessment of a Multidisciplinary Tool for Sustainable Water Resources Management Strategies. **Geography Compass**, n. 3, p. 1176–1195, 2009.

- MCKINNEY, D. C. et al. Modeling water resources management at the basin level: review and future directions. **International Water Management Institute (IWMI). ix, SWIM paper 6**, Colombo, Sri Lanka: 59 p., 1999.
- MCKINNEY, D. C.; WALTAKINS, D. W. Finding robust solutions to water resources problems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, n. 123, p. 49-58.
- MCMENAMIN, D.; HARING, J. E. An appraisal of nonsurvey techniques for estimating regional input-output models. **Journal of Regional Science**, v. 14, p. 191–205, 1974.
- MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions. **Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.**, [s.n.], 1985.
- MILLER, R.; BLAIR, P. **Input-Output Analysis. Foundations and Extensions.** [S.l.]: Cambridge University Press, New York., 2009.
- MOORE, C. V.; HEDGES, T. R. A Method for Estimating the Demand for Irrigation Water. **Agricultural Economics Research** , v. 15, p. 131-135, 1963.
- MOUNIR, Z. M.; MA, C. M.; AMADOU, I. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP): a model to assess future water demands in the Niger River (In Niger Republic). **Mathematical Methods in the Applied Sciences** , v. 5(1), p. 38–49, 2011.
- MUGAGGA, F.; NABAASA, B. B. The centrality of water resources to the realization of Sustainable Development Goals (SDG). A review of potentials and constraints on the African continent. **International Soil and Water Conservation Research**, 2016. 1–9.
- NETTO, O. D. M. C. Desafios da ANA – Agência Nacional de Águas na regulação do uso de recursos hídricos e de serviços dele derivados. **Águas do Brasil**, 2019. Disponível em:< <http://aguasdobrasil.org/artigo/desafios-da-ana-agencia-nacional/>>. Acessado em: 07/08/2019.
- NOEL, J. E.; GARDNER, B. D.; MOORE, C. V. Optimal regional conjunctive water management. **American Journal of Agricultural Economics** , v. 62 (3), p. 489–498, 1980.
- NOEL, J. E.; HOWITT, R. E. Conjunctive multibasin management – an optimal- control approach. **Water Resources Research** , v. 18 (4), p. 753–763, 1982.
- OECD. **Water Resources Allocation.** Sharing risks and opportunities, OECD Publishing. [S.l.], p. [s.n.]. 2015.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). Water governance in OECD countries: a multi-level approach. **OECD**, Paris: [s.n.], 2011.

PAHL-WOSTL, C. The implications of complexity for integrated resources management. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, p. 561–569, 2007.

PALERMO, P. U.; PORSSSE, A. A.; PEIXOTO, F. C. Relações setoriais e interdependência regional da economia gaúcha: análise com um modelo inter-regional de insumo-produto. **Ensaio FEE**, 2010. 31 p.

PÉREZ BLANCO, C. D.; THALER, T. An input–output assessment of water productivity in the Castile and León Region (Spain). **Water** , v. 6, p. 929–944, 2014.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe: Resumo Executivo. Projetec - BRLi**, Recife, 2010. Disponível em:<
http://www.sirh.srh.pe.gov.br/hidroambiental/files/capibaribe/TOMO%20IV%20-%20REX_PHACapibaribe_Final.pdf>. Acessado em 10/07/2019.

PERNAMBUCO. Secretaria de Infraestrutura. **Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH)**, Disponível em:
http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=458:perh-plano-estadual-de-recursos-hidricos-1998&catid=42:documentos&Itemid=75. Acesso em 09 set. 2019.

PLANO ESTADUAL DO PROGRAMA ÁGUA DOCE. Estado de Pernambuco (2010 a 2015). **Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos e Energéticos.**, Recife: 330 p., 2010.

PLANO Estadual do Programa Água Doce: Estado de Pernambuco. Recife:330 p.: Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos e Energéticos., 2010.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; ANDREU, J.; SAHUQUILLO, A. Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface–groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. **Ecological Economics** , v. 66, p. 51–65, 2006.

RANDALL, A. Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy. **The Australian Journal of Agricultural Economics**, n. 25, p. 195–220, 1981.

- REN, C. F. et al. Multiobjective stochastic fractional goal programming model for water resources optimal allocation among industries. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s.n.], v. 142, 2016.
- RENZETTI, S. The economics of water demands. **Kluwer Academic Publishers**, 191 p., 2002.
- REY, S. J. Integrated regional econometric input-output modeling: Issues and opportunities. **Papers in Regional Science**, v. 79(3), p. 271–292, 2000.
- RIBEIRO, C. H. Proposta e avaliação socioeconômica de um sistema de pagamento de cana-de-açúcar levando em consideração os produtos do bagaço e da palha. **Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica**, Campinas, SP: 288 p., 2018.
- RIBEIRO, L. C. S.; MONTENEGRO, R. L. G.; PEREIRA, R. M. Estrutura econômica e encadeamentos setoriais de Minas Gerais: uma contribuição para as políticas de planejamento. **Planejamento e Políticas Públicas**, [s.n.], 2013.
- ROBINSON, S.; WILLENBOCKEL, D.; STRZEPEK, K. A dynamic general equilibrium analysis of adaptation to climate change in Ethiopia. **Review of Development Economics**, v. 16(3), p. 489–502, 2012.
- ROGERS, P.; SMITH, D. V. Integrated use of ground and surface water in irrigation project planning. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 52 (1), p. 13, 1970.
- ROSEGRANT, M. W. et al. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. **Agricultural Economics**, v. 24, p. 33-46, 2000.
- ROSEGRANT, M. W.; BINSWANGER, H. Markets in Tradable Water Rights: Potential for Efficiency Gains in Developing Country Irrigation. **World Development**, n. 22, p. 1613-25, 1994.
- SAVENIJE, G. H. H.; ZAAG, V. D. Water as an economic good and demand management: paradigms and pitfalls. **Water International**, v. 27 (1), p. 98-104, 2002.
- SCHAFFER, W. A. On the Use of Input–Output Models for Regional Planning. **Martinus Nijhoff Social Sciences Division**, Leiden: [s.n.], 1976.

SCHWARZBACH, M.; LANNA, A. E. **MODHAC**: Um modelo hidrológico auto-calibrável para avaliação de disponibilidades hídricas fluviais. Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. [S.l.]: ABRH. 1989.

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. **SECTMA**, Recife: 104 p, 2006.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe: Resumo Executivo. **Projetec - BRLi**, Recife, 2010. Disponível em: http://www.sirh.srh.pe.gov.br/hidroambiental/files/capibaribe/TOMO%20IV%20-%20REX_PHACapibaribe_Final.pdf acessado em 15/07/2019.

SILVA, G. N. S. Apoio à gestão sustentável de recursos hídricos através de um modelo hidro-econômico desenvolvido em diferentes cenários de uso do solo e clima: o caso do sub-médio do São Francisco. **Tese de Doutorado em Economia – UFPE.**, Recife: [s.n.], 2017.

SILVA, G. S. D.; ALCOFORADO DE MORAES, M. M. G. Curvas de demanda da irrigação difusa e abastecimento humano e a identificação da alocação econômica ótima no Sub-médio do rio São Francisco. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH**, Brasília, 2015.

SILVA, T. L. D. V.; GUEDES, R. V. S. Análise do Comportamento Atmosférico em Situação de Seca: Uma Abordagem Operacional para Pernambuco (Analysis of Atmospheric Behavior Under Drought Condition: An Operational Approach to Pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 937-950, 2012.

SPRAGUE, R. H. A framework for the development of decision support systems. **Decision Support Systems**, [s.n.], 1989.

TOREZANI, T. A.; CALDAS, B. B.; CALDEIRA, J. F. Matriz Insumo Produto do RS e Brasil: Estimando os Multiplicadores Totais e os Impactos das Quebras de Safra da Soja no RS. **Anais eletrônicos. Porto Alegre: FEE. Encontro de Economia Gaúcha**, Porto Alegre: [s.n.], n. 8, 2016.

TORTAJADA, C.; JOSHI, Y. K. Water Demand Management in Singapore: Involving the Public. **Water Resources Management**, v. 27(8), p. 2729–2746, 2013.

UN-WATER. Water Policy Brief. Climate Change and Water. **Final Draft**, [s.n.], 2019.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. D. Processos de desertificação ocorrentes no Nordeste do Brasil: sua gênese e sua contenção. **SUDENE – DDL**, Recife: [s.n.], 1982.

- VELÁZQUEZ, E. An input–output model of water consumption: analysing intersectoral water relationships in Andalusia. **Ecological Economics**, v. 56, p. 226–240, 2006.
- WALSH, M. R. Toward spatial decision support systems in water resources. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 109, p. 158-169, 1992.
- WATER Resources Allocation. Sharing risks and opportunities. **OECD**, [s.n.], 2015.
- WORLD BANK. Environment Matters. **World Bank**, Washington: [s.n.], 2006.
- WORLD BANK GROUP. High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. **Executive Summary. ed. Washington: The World Bank**, [s.n.], 2016. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/862571468196731247/High-and-dry-climate-change-water-and-the-economy>. Acesso em: 4 junho 2019.
- WURBS, R. A.; MUTTIAH, R. S.; FELDEN, F. Incorporation of climate change in water availability modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 10, p. 375–385, 2005.
- WWAP (WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. **UNESCO**, Paris: [s.n.], 2012.
- XIA, D.-P.; HONG-YU, G.; DAN, H. Discussion on the Demand Management of Water Resources. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, p. 1173–1176, 2011.

APÊNDICE A

Tabela 21: Lista dos 88 municípios em que ao menos algum percentual está em alguma das quatro bacias: Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una. Fonte: Levantamento realizado pela doutora Marjorie Mendes Guarenghi.

Município de Pernambuco	% na bacia do Una	% na bacia do Sirinhaém	% na bacia do Ipojuca	% na bacia do Capibaribe
Agrestina	99%	0%	1%	0%
Água Preta	89%	11%	0%	0%
Alagoinha	0%	0%	32%	0%
Altinho	99%	0%	1%	0%
Amaraji	0%	75%	25%	0%
Arcoverde	0%	0%	27%	0%
Barra de Guabiraba	6%	95%	0%	0%
Barreiros	83%	0%	0%	0%
Belém de Maria	99%	0%	0%	0%
Belo Jardim	0%	0%	37%	63%
Bezerros	11%	0%	43%	45%
Bom Jardim	0%	0%	0%	25%
Bonito	72%	28%	0%	0%
Brejo da Madre de Deus	0%	0%	0%	100%
Cachoeirinha	99%	0%	1%	0%
Caetés	7%	0%	0%	0%
Calçado	66%	0%	0%	0%
Camaragibe	0%	0%	0%	65%
Camocim de São Félix	19%	81%	1%	0%
Canhotinho	7%	0%	0%	0%
Capoeiras	72%	0%	0%	0%
Carpina	0%	0%	0%	22%
Caruaru	1%	0%	41%	57%
Casinhas	0%	0%	0%	89%
Catende	100%	0%	0%	0%
Chã de Alegria	0%	0%	0%	100%
Chã Grande	0%	0%	82%	17%
Cortês	0%	100%	0%	0%
Cumarú	0%	0%	0%	100%
Cupira	100%	0%	0%	0%
Escada	0%	23%	56%	0%
Feira Nova	0%	0%	0%	100%
Frei Miguelinho	0%	0%	0%	101%
Gameleira	14%	86%	0%	0%
Glória do Goitá	0%	0%	0%	100%
Gravatá	0%	16%	38%	47%
Ibirajuba	100%	0%	0%	0%
Ipojuca	0%	34%	29%	0%
Jaqueira	100%	0%	0%	0%
Jataúba	0%	0%	0%	99%
João Alfredo	0%	0%	0%	39%
Joaquim Nabuco	53%	47%	0%	0%

Jucati	19%	0%	0%	0%
Jupi	57%	0%	0%	0%
Jurema	94%	0%	0%	0%
Lagoa do Carro	0%	0%	0%	54%
Lagoa de Itaenga	0%	0%	0%	99%
Lagoa dos Gatos	99%	0%	0%	0%
Lajedo	98%	0%	0%	0%
Limoeiro	0%	0%	0%	52%
Maraial	100%	0%	0%	0%
Moreno	0%	0%	0%	11%
Palmares	100%	0%	0%	0%
Panelas	100%	0%	0%	0%
Passira	0%	0%	0%	100%
Paudalho	0%	0%	0%	97%
Pesqueira	2%	0%	60%	0%
Poção	0%	0%	91%	9%
Pombos	0%	0%	27%	62%
Primavera	0%	20%	81%	0%
Quipapá	96%	0%	0%	0%
Recife	0%	0%	0%	30%
Riacho das Almas	0%	0%	2%	97%
Ribeirão	0%	100%	0%	0%
Rio Formoso	8%	43%	0%	0%
Sairé	0%	60%	39%	0%
Salgadinho	0%	0%	0%	98%
Sanharó	1%	0%	97%	2%
Santa Cruz do Capibaribe	0%	0%	0%	98%
Santa Maria do Cambucá	0%	0%	0%	98%
São Benedito do Sul	100%	0%	0%	0%
São Bento do Una	91%	0%	9%	0%
São Caetano	27%	0%	69%	4%
São Joaquim do Monte	97%	4%	0%	0%
São José da Coroa Grande	19%	0%	0%	0%
São Lourenço da Mata	0%	0%	0%	80%
Sirinhaém	0%	87%	0%	0%
Surubim	0%	0%	0%	100%
Tacaimbó	27%	0%	61%	12%
Tamandaré	43%	1%	0%	0%
Taquaritinga do Norte	0%	0%	0%	94%
Toritama	0%	0%	0%	98%
Tracunhaém	0%	0%	0%	8%
Venturosa	1%	0%	1%	0%
Vertente do Lério	0%	0%	0%	98%
Vertentes	0%	0%	0%	99%
Vitória de Santo Antão	0%	0%	12%	60%
Xexéu	100%	0%	0%	0%

Tabela 22: Agregação em regiões da matriz de Insumo-Produto dos 88 municípios da área de estudo.

Municípios da área de estudo	Região da matriz de Insumo-Produto	Municípios da área de estudo	Região da matriz de Insumo-Produto
Agrestina	Agrestina	Jurema	Jurema
Água Preta	Água Preta	Lagoa do Carro	Lagoa do Carro
Alagoinha	Resto de Pernambuco	Lagoa do Itaenga	Lagoa do Itaenga
Altinho	Altinho	Lagoa dos Gatos	Lagoa dos Gatos
Amaraji	Amaraji	Lajedo	Lajedo
Arcoverde	Arcoverde	Limoeiro	Limoeiro
Barra de Guabiraba	Barra de Guabiraba	Maraial	Maraial
Barreiros	Barreiros	Moreno	Moreno
Belem de Maria	Belem de Maria	Palmares	Palmares
Belo Jardim	Belo Jardim	Panelas	Panelas
Bezerros	Bezerros	Passira	Agregado Jucazinho
Bom Jardim	Resto de Pernambuco	Paudalho	Paudalho
Bonito	Bonito	Pesqueira	Agregado Bitury
Brejo da Madre de Deus	Brejo da Madre de Deus	Poção	Poção
Cachoeirinha	Agregado Bitury	Pombos	Pombos
Caetés	Agregado Caetés/Capoeiras	Primavera	Primavera
Calcado	Calcado	Quipapá	Quipapá
Camaragibe	Camaragibe	Recife	Recife
Camocim de São Felix	Camocim de São Felix	Riacho das Almas	Agregado Jucazinho
Canhotinho	Canhotinho	Ribeirão	Ribeirão
Capoeiras	Agregado Caetés/Capoeiras	Rio Formoso	Rio Formoso
Carpina	Carpina	Saire	Saire
Caruaru	Caruaru	Salgadinho	Agregado Jucazinho
Casinhas	Agregado Jucazinho	Sanharó	Agregado Bitury
Catende	Catende	Santa Cruz do Capibaribe	Santa Cruz do Capibaribe
Cha de Alegria	Cha de Alegria	Santa Maria do Cambucá	Agregado Jucazinho
Cha Grande	Cha Grande	São Benedito do Sul	São Benedito do Sul
Cortes	Cortes	São Bento do Una	Agregado Bitury
Cumarú	Agregado Jucazinho	São Caetano	São Caetano
Cupira	Cupira	São Joaquim do Monte	São Joaquim do Monte
Escada	Escada	São Jose da Coroa Grande	São Jose da Coroa Grande
Feira Nova	Feira Nova	São Lourenço da Mata	São Lourenço da Mata
Frei Miguelinho	Agregado Jucazinho	Sirinhaem	Sirinhaem
Gameleira	Gameleira	Surubim	Agregado Jucazinho
Gloria do Goitá	Gloria do Goitá	Tacaimbó	Agregado Bitury
Gravata	Gravata	Tamandaré	Tamandaré
Ibirajuba	Ibirajuba	Taquaritinga do Norte	Taquaritinga do Norte
Ipojuca	Ipojuca	Toritama	Toritama
Jaqueira	Jaqueira	Tracunhaém	Tracunhaém
Jataúba	Jataúba	Venturosa	Venturosa
João Alfredo	Resto de Pernambuco	Vertente do Lério	Agregado Jucazinho
Joaquim Nabuco	Joaquim Nabuco	Vertentes	Agregado Jucazinho
Jucati	Jucati	Vitoria de Santo Antão	Vitoria de Santo Antão
Jupi	Jupi	Xexéu	Xexéu

Tabela 23: Todos os 76 setores econômicos da matriz de Insumo-Produto utilizados nessa tese

Setores econômicos da matriz de Insumo-Produto			
1	Cultivo de milho	39	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura
2	Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	40	Metalurgia de metais não ferrosos
3	Cultivo de cana-de-açúcar	41	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
4	Outros da fruticultura	42	Fabricação de produtos eletrônicos, equipamentos de comunicação e equipamentos de informática e periféricos
5	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	43	Fabricação de equip. de medida, teste e controle, ópticos e eletro médicos
6	Pecuária	44	Fabricação de eletrodomésticos
7	Produção florestal	45	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos
8	Pesca e Aquicultura	46	Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos
9	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	47	Fabricação de automóveis, camionetas, utilitários e caminhões e ônibus
10	Extração de petróleo e gás natural	48	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores
11	Abate de animais exceto pescado	49	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores
12	Preservação do pescado e fabricação de produtos do pescado	50	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas
13	Laticínios e Outros produtos alimentares	51	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
14	Fabricação e refino de açúcar	52	Geração de energia elétrica
15	Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	53	Transmissão de energia elétrica
16	Fabricação de alimentos para animais	54	Distribuição de energia elétrica
17	Beneficiamento de produtos vegetais	55	Produção e distribuição de gás natural e outras utilidades
18	Fabricação de bebidas alcoólicas	56	Água e esgoto
19	Fabricação de bebidas não alcoólicas	57	Resíduos
20	Fabricação de produtos têxteis	58	Construção
21	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	59	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas
22	Fabricação de calçados e de artefatos de couro	60	Comércio atacadista
23	Fabricação de produtos da madeira	61	Comércio varejista
24	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	62	Transporte terrestre
25	Impressão e reprodução de gravações	63	Transporte dutoviário de carga
26	Refino de petróleo e coquerias	64	Transporte aquaviário
27	Fabricação de álcool	65	Transporte aéreo
28	Fabricação de biocombustíveis, exceto álcool	66	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios
29	Fabricação de adubos e fertilizantes	67	Alojamento
30	Fabricação de produtos petroquímicos básicos	68	Alimentação
31	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	69	Edição e edição integrada à impressão
32	Fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários	70	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
33	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	71	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar

34	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	72	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares
35	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	73	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social
36	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	74	Educação
37	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	75	Saúde
38	Fabricação de cimento	76	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos

Tabela 24: Todos os 288 setores do CNAE 2.0 encontrados na área de estudo e seu correspondente (Tabela 23) na matriz de Insumo-Produto.

CNAE 2.0	Descrição do setor	Nº do setor correspondente da matriz de Insumo-Produto	CNAE 2.0	Descrição do setor	Nº do setor correspondente da matriz de Insumo-Produto
1113	Cultivo de cereais	1	38394	Recuperação de materiais não especificados anteriormente	57
1121	Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	2	41107	Incorporação de empreendimentos imobiliários	58
1130	Cultivo de cana-de-açúcar	3	41204	Construção de edifícios	58
1164	Cultivo de oleaginosas de lavoura temporária, exceto soja	5	42111	Construção de rodovias e ferrovias	58
1199	Cultivo de plantas de lavoura temporária não especificadas anteriormente	5	42120	Construção de obras-de-arte especiais	58
1211	Horticultura	5	42219	Obras para geração e distribuição de energia elétrica e para telecomunicações	58
1229	Cultivo de flores e plantas ornamentais	5	42227	Construção de redes de abastecimento de água, coleta de esgoto e construções correlatas	58
1326	Cultivo de uva	4	42995	Obras de engenharia civil não especificadas anteriormente	58
1334	Cultivo de frutas de lavoura permanente, exceto laranja e uva	4	43126	Perfurações e sondagens	58
1342	Cultivo de café	5	43134	Obras de terraplenagem	58
1393	Cultivo de plantas de lavoura permanente não especificadas anteriormente	5	43304	Obras de acabamento	58
1500	Pecuária	6	43991	Serviços especializados para construção não especificados anteriormente	58
1512	Criação de bovinos	6	45111	Comércio a varejo e por atacado de veículos automotores	59

1555	Criação de aves	6	45129	Representantes comerciais e agentes do comércio de veículos automotores	59
1610	Atividades de apoio à agricultura	6	45200	Manutenção e reparação de veículos automotores	59
2101	Produção florestal - florestas plantadas	7	45307	Comércio de peças e acessórios para veículos automotores	59
2209	Produção florestal - florestas nativas	7	46117	Representantes comerciais e agentes do comércio de matérias-primas agrícolas e animais vivos	60
3213	Aquicultura em água salgada e salobra	8	46311	Comércio atacadista de leite e laticínios	60
3221	Aquicultura em água doce	8	46320	Comércio atacadista de cereais e leguminosas beneficiados, farinhas, amidos e féculas	60
8100	Extração de pedra, areia e argila	9	46338	Comércio atacadista de hortifrutigranjeiros	60
8924	Extração e refino de sal marinho e sal-gema	9	46346	Comércio atacadista de carnes, produtos da carne e pescado	60
8991	Extração de minerais não-metálicos não especificados anteriormente	9	46354	Comércio atacadista de bebidas	60
9904	Atividades de apoio à extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	9	46371	Comércio atacadista especializado em produtos alimentícios não especificados anteriormente	60
10121	Abate de suínos, aves e outros pequenos animais	11	46397	Comércio atacadista de produtos alimentícios em geral	60
10139	Fabricação de produtos de carne	11	46419	Comércio atacadista de tecidos, artefatos de tecidos e de armarinho	60
10201	Preservação do pescado e fabricação de produtos do pescado	12	46443	Comércio atacadista de produtos farmacêuticos para uso humano e veterinário	60
10317	Fabricação de conservas de frutas	13	46451	Comércio atacadista de instrumentos e materiais para uso médico, cirúrgico, ortopédico e odontológico	60
10333	Fabricação de sucos de frutas, hortaliças e legumes	19	46478	Comércio atacadista de artigos de escritório e de papelaria; livros, jornais e outras publicações	60
10414	Fabricação de óleos vegetais em bruto, exceto óleo de milho	15	46621	Comércio atacadista de máquinas, equipamentos para terraplenagem, mineração e construção; partes e peças	60
10520	Fabricação de laticínios	13	46630	Comércio atacadista de máquinas e equipamentos para uso industrial; partes e peças	60
10538	Fabricação de sorvetes e outros gelados comestíveis	13	46699	Comércio atacadista de máquinas, aparelhos e equipamentos não especificados anteriormente; partes e peças	60
10619	Beneficiamento de arroz e fabricação de produtos do arroz	13	46737	Comércio atacadista de material elétrico	60

10627	Moagem de trigo e fabricação de derivados	13	46796	Comércio atacadista especializado de materiais de construção não especificados anteriormente e de materiais de construção em geral	60
10643	Fabricação de farinha de milho e derivados, exceto óleos de milho	13	46818	Comércio atacadista de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, exceto gás natural e GLP	60
10651	Fabricação de amidos e féculas de vegetais e de óleos de milho	13	46826	Comércio atacadista de gás liquefeito de petróleo (GLP)	60
10660	Fabricação de alimentos para animais	16	46842	Comércio atacadista de produtos químicos e petroquímicos, exceto agroquímicos	60
10716	Fabricação de açúcar em bruto	14	46877	Comércio atacadista de resíduos e sucatas	60
10724	Fabricação de açúcar refinado	14	46893	Comércio atacadista especializado de outros produtos intermediários não especificados anteriormente	60
10813	Torrefação e moagem de café	17	46915	Comércio atacadista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios	60
10911	Fabricação de produtos de panificação	13	46923	Comércio atacadista de mercadorias em geral, com predominância de insumos agropecuários	60
10929	Fabricação de biscoitos e bolachas	13	47113	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - hipermercados e supermercados	61
10945	Fabricação de massas alimentícias	13	47121	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - minimercados, mercearias e armazéns	61
10953	Fabricação de especiarias, molhos, temperos e condimentos	13	47130	Comércio varejista de mercadorias em geral, sem predominância de produtos alimentícios	61
10996	Fabricação de produtos alimentícios não especificados anteriormente	13	47211	Comércio varejista de produtos de padaria, laticínio, doces, balas e semelhantes	61
11119	Fabricação de aguardentes e outras bebidas destiladas	18	47229	Comércio varejista de carnes e pescados - açougues e peixarias	61
11127	Fabricação de vinho	18	47245	Comércio varejista de hortifrutigranjeiros	61
11135	Fabricação de malte, cervejas e chopes	18	47296	Comércio varejista de produtos alimentícios em geral ou especializado em produtos alimentícios não especificados anteriormente; produtos do fumo	61
11216	Fabricação de águas envasadas	19	47318	Comércio varejista de combustíveis para veículos automotores	61
11224	Fabricação de refrigerantes e de outras bebidas não alcoólicas	19	47326	Comércio varejista de lubrificantes	61

13111	Preparação e fiação de fibras de algodão	20	47440	Comércio varejista de ferragens, madeira e materiais de construção	61
13120	Preparação e fiação de fibras têxteis naturais, exceto algodão	20	47547	Comércio varejista especializado de móveis, colchoaria e artigos de iluminação	61
13138	Fiação de fibras artificiais e sintéticas	20	47571	Comércio varejista especializado de peças e acessórios para aparelhos eletroeletrônicos para uso doméstico, exceto informática e comunicação	61
13219	Tecelagem de fios de algodão	20	47610	Comércio varejista de livros, jornais, revistas e papelaria	61
13308	Fabricação de tecidos de malha	20	47725	Comércio varejista de cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal	61
13405	Acabamentos em fios, tecidos e artefatos têxteis	21	47822	Comércio varejista de calçados e artigos de viagem	61
13511	Fabricação de artefatos têxteis para uso doméstico	21	47849	Comércio varejista de gás liquefeito de petróleo (GLP)	61
14126	Confecção de peças do vestuário, exceto roupas íntimas	21	47890	Comércio varejista de outros produtos novos não especificados anteriormente	61
15106	Curtimento e outras preparações de couro	22	49116	Transporte ferroviário de carga	62
15394	Fabricação de calçados de materiais não especificados anteriormente	22	49213	Transporte rodoviário coletivo de passageiros, com itinerário fixo, municipal e em região metropolitana	62
16234	Fabricação de artefatos de tanoaria e de embalagens de madeira	23	49221	Transporte rodoviário coletivo de passageiros, com itinerário fixo, intermunicipal, interestadual e internacional	62
17214	Fabricação de papel	24	49230	Transporte rodoviário de táxi	62
17311	Fabricação de embalagens de papel	24	49299	Transporte rodoviário coletivo de passageiros, sob regime de fretamento, e outros transportes rodoviários não especificados anteriormente	62
17427	Fabricação de produtos de papel para usos doméstico e higiênico-sanitário	24	49302	Transporte rodoviário de carga	62
18121	Impressão de material de segurança	25	49400	Transporte dutoviário	63
19217	Fabricação de produtos do refino de petróleo	26	52117	Armazenamento	66
19314	Fabricação de álcool	27	52214	Concessionárias de rodovias, pontes, túneis e serviços relacionados	66
20118	Fabricação de cloro e álcalis	31	52290	Atividades auxiliares dos transportes terrestres não especificadas anteriormente	66
20134	Fabricação de adubos e fertilizantes	29	52311	Gestão de portos e terminais	66
20142	Fabricação de gases industriais	31	52401	Atividades auxiliares dos transportes aéreos	66
20215	Fabricação de produtos petroquímicos básicos	30	55108	Hotéis e similares	67

20321	Fabricação de resinas termofixas	31	55906	Outros tipos de alojamento não especificados anteriormente	67
20339	Fabricação de elastômeros	31	56112	Restaurantes e outros estabelecimentos de serviços de alimentação e bebidas	68
20401	Fabricação de fibras artificiais e sintéticas	31	56201	Serviços de catering, bufê e outros serviços de comida preparada	68
20517	Fabricação de defensivos agrícolas	32	58212	Edição integrada à impressão de livros	69
20525	Fabricação de desinfetantes domissanitários	32	60217	Atividades de televisão aberta	70
20614	Fabricação de sabões e detergentes sintéticos	34	61906	Outras atividades de telecomunicações	70
20622	Fabricação de produtos de limpeza e polimento	34	62023	Desenvolvimento e licenciamento de programas de computador customizáveis	70
20631	Fabricação de cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal	34	62031	Desenvolvimento e licenciamento de programas de computador não-customizáveis	70
20711	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes e lacas	33	62040	Consultoria em tecnologia da informação	70
20738	Fabricação de impermeabilizantes, solventes e produtos afins	33	63992	Outras atividades de prestação de serviços de informação não especificadas anteriormente	70
20916	Fabricação de adesivos e selantes	33	64620	Holdings de instituições não-financeiras	71
20924	Fabricação de explosivos	33	64638	Outras sociedades de participação, exceto holdings	71
20932	Fabricação de aditivos de uso industrial	33	65120	Seguros não-vida	71
20991	Fabricação de produtos químicos não especificados anteriormente	33	66193	Atividades auxiliares dos serviços financeiros não especificadas anteriormente	71
21106	Fabricação de produtos farmoquímicos	35	68102	Atividades imobiliárias de imóveis próprios	72
21211	Fabricação de medicamentos para uso humano	35	68218	Intermediação na compra, venda e aluguel de imóveis	72
22129	Reforma de pneumáticos usados	36	68226	Gestão e administração da propriedade imobiliária	72
22196	Fabricação de artefatos de borracha não especificados	36	69117	Atividades jurídicas, exceto cartórios	72
22218	Fabricação de laminados planos e tubulares de material plástico	36	69206	Atividades de contabilidade, consultoria e auditoria contábil e tributária	72
22226	Fabricação de embalagens de material plástico	36	70204	Atividades de consultoria em gestão empresarial	72
22234	Fabricação de tubos e acessórios de material plástico para uso na construção	36	71111	Serviços de arquitetura	72
22293	Fabricação de artefatos de material plástico não especificados anteriormente	36	71120	Serviços de engenharia	72

23117	Fabricação de vidro plano e de segurança	37	71201	Testes e análises técnicas	72
23125	Fabricação de embalagens de vidro	37	73114	Agências de publicidade	72
23206	Fabricação de cimento	38	73190	Atividades de publicidade não especificadas anteriormente	72
23303	Fabricação de artefatos de concreto, cimento, fibrocimento, gesso e materiais semelhantes	37	75001	Atividades veterinárias	72
23427	Fabricação de produtos cerâmicos não-refratários para uso estrutural na construção	37	77110	Locação de automóveis sem condutor	72
23494	Fabricação de produtos cerâmicos não-refratários não especificados anteriormente	37	77233	Aluguel de objetos do vestuário, joias e acessórios	72
23915	Aparelhamento e outros trabalhos em pedras	37	77322	Aluguel de máquinas e equipamentos para construção sem operador	72
23923	Fabricação de cal e gesso	37	77390	Aluguel de máquinas e equipamentos não especificados anteriormente	72
23991	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos não especificados anteriormente	37	78205	Locação de mão-de-obra temporária	72
24245	Produção de relaminados, trefilados e perfilados de aço	39	78302	Fornecimento e gestão de recursos humanos para terceiros	72
24415	Metalurgia do alumínio e suas ligas	40	79112	Agências de viagens	72
25110	Fabricação de estruturas metálicas	41	79902	Serviços de reservas e outros serviços de turismo não especificados anteriormente	72
25128	Fabricação de esquadrias de metal	41	81125	Condomínios prediais	72
25136	Fabricação de obras de caldeiraria pesada	41	81214	Limpeza em prédios e em domicílios	72
25217	Fabricação de tanques, reservatórios metálicos e caldeiras para aquecimento central	41	81290	Atividades de limpeza não especificadas anteriormente	72
25322	Produção de artefatos estampados de metal; metalurgia do pó	41	82113	Serviços combinados de escritório e apoio administrativo	72
25420	Fabricação de artigos de serralheria, exceto esquadrias	41	82300	Atividades de organização de eventos, exceto culturais e esportivos	76
25438	Fabricação de ferramentas	41	82911	Atividades de cobrança e informações cadastrais	72
25918	Fabricação de embalagens metálicas	41	82997	Atividades de serviços prestados principalmente às empresas não especificadas anteriormente	72
25993	Fabricação de produtos de metal não especificados anteriormente	41	84116	Administração pública em geral	73
27104	Fabricação de geradores, transformadores e motores elétricos	45	84221	Defesa	73

27210	Fabricação de pilhas, baterias e acumuladores elétricos, exceto para veículos automotores	45	84248	Segurança e ordem pública	73
27317	Fabricação de aparelhos e equipamentos para distribuição e controle de energia elétrica	45	85121	Educação infantil - pré-escola	74
27406	Fabricação de lâmpadas e outros equipamentos de iluminação	45	85139	Ensino fundamental	74
27902	Fabricação de equipamentos e aparelhos elétricos não especificados anteriormente	45	85201	Ensino médio	74
28224	Fabricação de máquinas, equipamentos e aparelhos para transporte e elevação de cargas e pessoas	46	85317	Educação superior - graduação	74
28232	Fabricação de máquinas e aparelhos de refrigeração e ventilação para uso industrial e comercial	46	85325	Educação superior - graduação e pós-graduação	74
28291	Fabricação de máquinas e equipamentos de uso geral não especificados anteriormente	46	85333	Educação superior - pós-graduação e extensão	74
28402	Fabricação de máquinas-ferramenta	46	85422	Educação profissional de nível tecnológico	74
28615	Fabricação de máquinas para a indústria metalúrgica, exceto máquinas-ferramenta	46	85937	Ensino de idiomas	74
28623	Fabricação de máquinas e equipamentos para as indústrias de alimentos, bebidas e fumo	46	85996	Atividades de ensino não especificadas anteriormente	74
29107	Fabricação de automóveis, camionetas e utilitários	47	86101	Atividades de atendimento hospitalar	75
29301	Fabricação de cabines, carrocerias e reboques para veículos automotores	48	86305	Atividades de atenção ambulatorial executadas por médicos e odontólogos	75
29425	Fabricação de peças e acessórios para os sistemas de marcha e transmissão de veículos automotores	48	86402	Atividades de serviços de complementação diagnóstica e terapêutica	75
30113	Construção de embarcações e estruturas flutuantes	49	86500	Atividades de profissionais da área de saúde, exceto médicos e odontólogos	75
30911	Fabricação de motocicletas	49	86607	Atividades de apoio à gestão de saúde	75
30920	Fabricação de bicicletas e triciclos não-motorizados	49	86909	Atividades de atenção à saúde humana não especificadas anteriormente	75
31012	Fabricação de móveis com predominância de madeira	50	87301	Atividades de assistência social prestadas em residências coletivas e particulares	75
31021	Fabricação de móveis com predominância de metal	50	88006	Serviços de assistência social sem alojamento	75
31047	Fabricação de colchões	50	93115	Gestão de instalações de esportes	76

32302	Fabricação de artefatos para pesca e esporte	50	93123	Clubes sociais, esportivos e similares	76
32507	Fabricação de instrumentos e materiais para uso médico e odontológico e de artigos ópticos	50	93131	Atividades de condicionamento físico	76
35115	Geração de energia elétrica	52	93191	Atividades esportivas não especificadas anteriormente	76
35123	Transmissão de energia elétrica	53	93212	Parques de diversão e parques temáticos	76
35140	Distribuição de energia elétrica	54	93298	Atividades de recreação e lazer não especificadas anteriormente	76
36006	Captação, tratamento e distribuição de água	56	94308	Atividades de associações de defesa de direitos sociais	76
37029	Atividades relacionadas a esgoto, exceto a gestão de redes	56	94910	Atividades de organizações religiosas	76
38114	Coleta de resíduos não-perigosos	57	94995	Atividades associativas não especificadas anteriormente	76
38122	Coleta de resíduos perigosos	57	96017	Lavanderias, tinturarias e toalheiros	20
38211	Tratamento e disposição de resíduos não-perigosos	57	96025	Cabeleireiros e outras atividades de tratamento de beleza	76
38220	Tratamento e disposição de resíduos perigosos	57	96033	Atividades funerárias e serviços relacionados	76
38327	Recuperação de materiais plásticos	57	99008	Organismos internacionais e outras instituições extraterritoriais	72

APÊNDICE B

Tabela 25: Variação na demanda final⁹⁸ nos setores e regiões da matriz de Insumo-Produto no cenário alternativo. Fonte: Elaboração própria do autor.

Região	Setor econômico	Variação da demanda final (em milhões de reais)	Região	Setor econômico	Variação da demanda final (em milhões de reais)
Resto do Brasil	Cultivo de milho	0,5	Resto de Pernambuco	Comércio atacadista	1,1
Resto do Brasil	Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	0,3	Resto de Pernambuco	Transporte terrestre	0,9

⁹⁸ Para as regiões e setores econômicos em que a variação da demanda final foi superior em valor absoluto a 50 mil reais. Para as outras 5.520 regiões e setores econômicos estudadas nessa tese a variação da demanda final em valor absoluto foi menor ou igual a 50 mil reais.

Resto do Brasil	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	1,3	Resto de Pernambuco	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,2
Resto do Brasil	Pecuária	0,6	Resto de Pernambuco	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	0,2
Resto do Brasil	Produção florestal	0,3	Resto de Pernambuco	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	0,2
Resto do Brasil	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	1,1	Resto de Pernambuco	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,5
Resto do Brasil	Extração de petróleo e gás natural	0,2	Resto de Pernambuco	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,2
Resto do Brasil	Abate de animais exceto pescado	0,8	Agregado Jucazinho	Pecuária	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	0,6	Agregado Bitury	Pecuária	-42,9
Resto do Brasil	Fabricação de alimentos para animais	0,3	Agregado Bitury	Fabricação de alimentos para animais	0,2
Resto do Brasil	Beneficiamento de produtos vegetais	0,6	Agregado Bitury	Comércio atacadista	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de produtos têxteis	0,6	Barra de Guabiraba	Cultivo de cana-de-açúcar	-0,3
Resto do Brasil	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,2	Belo Jardim	Pecuária	0,3
Resto do Brasil	Fabricação de produtos da madeira	0,8	Belo Jardim	Abate de animais exceto pescado	-20,1
Resto do Brasil	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,3	Belo Jardim	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,2
Resto do Brasil	Impressão e reprodução de gravações	0,2	Belo Jardim	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	-3,1
Resto do Brasil	Refino de petróleo e coqueiras	2,8	Belo Jardim	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de biocombustíveis, exceto álcool	0,2	Belo Jardim	Comércio atacadista	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de adubos e fertilizantes	0,6	Belo Jardim	Transporte terrestre	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,5	Belo Jardim	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,2

Resto do Brasil	Fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários	0,3	Bezerros	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	-6,6
Resto do Brasil	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	0,5	Bonito	Pecuária	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	0,5	Camocim de São Felix	Pecuária	-0,2
Resto do Brasil	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,6	Caruaru	Pecuária	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	1,4	Caruaru	Fabricação de produtos têxteis	-7,4
Resto do Brasil	Fabricação de cimento	0,6	Caruaru	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	-16,3
Resto do Brasil	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	2,0	Caruaru	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,3
Resto do Brasil	Metalurgia de metais não ferrosos	0,2	Caruaru	Impressão e reprodução de gravações	0,2
Resto do Brasil	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	1,7	Caruaru	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,9
Resto do Brasil	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,3	Caruaru	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	-14,8
Resto do Brasil	Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos	0,3	Caruaru	Metalurgia de metais não ferrosos	0,2
Resto do Brasil	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	0,3	Caruaru	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,6
Resto do Brasil	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0,6	Caruaru	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,5
Resto do Brasil	Geração de energia elétrica	0,8	Caruaru	Distribuição de energia elétrica	0,5
Resto do Brasil	Transmissão de energia elétrica	0,2	Caruaru	Resíduos	0,2
Resto do Brasil	Produção e distribuição de gás natural e outras utilidades	0,2	Caruaru	Construção	-61,3
Resto do Brasil	Construção	1,3	Caruaru	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	0,2
Resto do Brasil	Comércio atacadista	1,3	Caruaru	Comércio atacadista	-60,2
Resto do Brasil	Comércio varejista	0,2	Caruaru	Comércio varejista	0,3
Resto do Brasil	Transporte terrestre	0,5	Caruaru	Transporte terrestre	1,9
Resto do Brasil	Transporte aquaviário	0,2	Caruaru	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,3

Resto do Brasil	Transporte aéreo	0,2	Caruaru	Alojamento	0,2
Resto do Brasil	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,2	Caruaru	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	0,3
Resto do Brasil	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	0,3	Caruaru	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	1,7
Resto do Brasil	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	1,6	Caruaru	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	6,0
Resto do Brasil	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	1,4	Caruaru	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,2
Resto do Brasil	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,2	Caruaru	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,2
Resto do Nordeste	Cultivo de milho	0,2	Cha de Alegria	Cultivo de cana-de-açúcar	-0,5
Resto do Nordeste	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,2	Cha de Alegria	Comércio atacadista	-0,5
Resto do Nordeste	Pecuária	0,3	Ipojuca	Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	0,2
Resto do Nordeste	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,2	Ipojuca	Fabricação de produtos têxteis	0,2
Resto do Nordeste	Beneficiamento de produtos vegetais	0,2	Ipojuca	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de produtos têxteis	0,9	Ipojuca	Construção	-19,5
Resto do Nordeste	Refino de petróleo e coquearias	0,2	Ipojuca	Comércio atacadista	2,4
Resto do Nordeste	Fabricação de adubos e fertilizantes	0,2	Ipojuca	Transporte terrestre	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,2	Ipojuca	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,3	Ipojuca	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de cimento	1,1	Jucati	Pecuária	0,2

Resto do Nordeste	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,2	Jupi	Pecuária	0,2
Resto do Nordeste	Geração de energia elétrica	0,2	Lagoa do Itaenga	Cultivo de cana-de-açúcar	-0,5
Resto do Nordeste	Construção	0,3	Moreno	Pecuária	0,2
Resto do Nordeste	Comércio atacadista	0,3	Paudalho	Cultivo de cana-de-açúcar	-3,1
Resto do Nordeste	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,2	Paudalho	Pecuária	0,2
Resto do Nordeste	Cultivo de algodão herbáceo e de outras fibras de lavoura temporária	0,2	Paudalho	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,2
Resto do Nordeste	Pecuária	0,2	Recife	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,2
Resto do Nordeste	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,2	Recife	Beneficiamento de produtos vegetais	0,3
Resto do Nordeste	Refino de petróleo e coquearias	0,5	Recife	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de adubos e fertilizantes	0,2	Recife	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,2	Recife	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,2
Resto do Nordeste	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,2	Recife	Fabricação de cimento	0,5
Resto do Nordeste	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	0,2	Recife	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	0,2
Resto do Nordeste	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0,2	Recife	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,2
Resto do Nordeste	Construção	0,2	Recife	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0,2
Resto do Nordeste	Comércio atacadista	0,2	Recife	Distribuição de energia elétrica	0,3
Resto de Pernambuco	Pecuária	2,51	Recife	Água e esgoto	0,2
Resto de Pernambuco	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,3	Recife	Construção	0,2
Resto de Pernambuco	Laticínios e Outros produtos alimentares	0,2	Recife	Comércio atacadista	2,0
Resto de Pernambuco	Fabricação de alimentos para animais	0,2	Recife	Transporte terrestre	0,8

Resto de Pernambuco	Beneficiamento de produtos vegetais	0,5	Recife	Transporte aéreo	0,2
Resto de Pernambuco	Fabricação de produtos têxteis	0,8	Recife	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,3
Resto de Pernambuco	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,5	Recife	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	0,6
Resto de Pernambuco	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,6	Recife	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	0,8
Resto de Pernambuco	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	0,5	Recife	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	1,1
Resto de Pernambuco	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,3	Recife	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,2
Resto de Pernambuco	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,5	Ribeirão	Cultivo de cana-de-açúcar	-2,7
Resto de Pernambuco	Fabricação de cimento	1,1	Ribeirão	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	-0,2
Resto de Pernambuco	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,2	Ribeirão	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	-0,2
Resto de Pernambuco	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0,2	Ribeirão	Construção	-0,2
Resto de Pernambuco	Distribuição de energia elétrica	0,2	São Lourenço da Mata	Cultivo de cana-de-açúcar	-0,6
Resto de Pernambuco	Construção	0,2	Sirinhaem	Cultivo de cana-de-açúcar	-0,6

Valores atualizados para o ano de 2019 pelo IPCA

APÊNDICE C

Tabela 26: Valores da elasticidade de produção com relação a variação da água bruta para as regiões e setores econômicos que utilizam a água bruta na área de estudo. Fonte: Viana (2019).

Regiões	Setor econômico	Elasticidade de produção com relação a variação da água bruta	Regiões	Setor econômico	Elasticidade de produção com relação a variação da água bruta
Agregado Jucazinho	Fabricação de produtos têxteis	0,09990	Jaqueira	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00162
Agregado Bitury	Pecuária	0,17124	Jaqueira	Fabricação de álcool	0,06848
Agregado Bitury	Abate de animais exceto pescado	0,11376	Jaqueira	Transporte terrestre	0,09152
Agregado Bitury	Transporte terrestre	0,09152	Jataúba	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158
Agregado Caetés/Capoeiras	Pecuária	0,17124	Joaquim Nabuco	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00185
Agregado Caetés/Capoeiras	Construção	0,10087	Joaquim Nabuco	Fabricação e refino de açúcar	0,08268
Água Preta	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00375	Joaquim Nabuco	Construção	0,10087
Água Preta	Outros da fruticultura	0,00132	Jurema	Cultivo de milho	0,00503
Água Preta	Pesca e Aquicultura	0,07021	Lagoa do Carro	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00247
Água Preta	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158	Lagoa do Itaenga	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00177
Água Preta	Construção	0,10087	Lagoa do Itaenga	Fabricação e refino de açúcar	0,08268
Água Preta	Transporte terrestre	0,09152	Lagoa do Itaenga	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122
Amaraji	Outros da fruticultura	0,00335	Lagoa dos Gatos	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00013
Amaraji	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00376	Limoeiro	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00157
Amaraji	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,14152	Limoeiro	Outros da fruticultura	0,00431

Arcoverde	Transporte terrestre	0,09152	Limoeiro	Pecuária	0,17124
Barra de Guabiraba	Cultivo de milho	0,00211	Maraial	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00183
Barra de Guabiraba	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00309	Maraial	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158
Barra de Guabiraba	Outros da fruticultura	0,00149	Maraial	Fabricação de álcool	0,06848
Barra de Guabiraba	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00299	Moreno	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,10023
Barreiros	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00326	Moreno	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413
Barreiros	Comércio varejista	0,11850	Moreno	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,18827
Belem de Maria	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00504	Palmares	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00428
Belo Jardim	Pecuária	0,17124	Palmares	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158
Belo Jardim	Abate de animais exceto pescado	0,11376	Palmares	Construção	0,10087
Belo Jardim	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122	Palmares	Comércio atacadista	0,10278
Bezerros	Cultivo de milho	0,00343	Palmares	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413

Bezerros	Outros da fruticultura	0,00538	Palmares	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,11603
Bezerros	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00520	Paudalho	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00163
Bezerros	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158	Paudalho	Outros da fruticultura	0,00348
Bezerros	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413	Paudalho	Comércio varejista	0,11850
Bonito	Cultivo de milho	0,00275	Paudalho	Transporte terrestre	0,09152
Bonito	Outros da fruticultura	0,00412	Pombos	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00571
Bonito	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00375	Pombos	Pesca e Aquicultura	0,07021
Bonito	Construção	0,10087	Primavera	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00528
Brejo da Madre de Deus	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00378	Quipapá	Construção	0,10087
Camagibe	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413	Recife	Cultivo de milho	0,00649
Camocim de São Felix	Cultivo de milho	0,00289	Recife	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413

Camocim de São Felix	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00495	Recife	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,18827
Camocim de São Felix	Pecuária	0,17124	Ribeirão	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00189
Canhotinho	Cultivo de milho	0,00333	Ribeirão	Outros da fruticultura	0,00319
Canhotinho	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158	Ribeirão	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00688
Carpina	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00135	Ribeirão	Fabricação e refino de açúcar	0,08268
Caruaru	Cultivo de milho	0,00600	Ribeirão	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,14152
Caruaru	Abate de animais exceto pescado	0,11376	Ribeirão	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122
Caruaru	Fabricação de produtos têxteis	0,09990	Ribeirão	Construção	0,10087
Caruaru	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,10391	Rio Formoso	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122
Caruaru	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122	Saire	Cultivo de milho	0,00472
Caruaru	Construção	0,10087	Saire	Outros da fruticultura	0,00577
Caruaru	Comércio atacadista	0,10278	Saire	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00341
Caruaru	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413	Saire	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158

Catende	Cultivo de milho	0,00261	Saire	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122
Cha de Alegria	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00160	Saire	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13413
Cha de Alegria	Comércio atacadista	0,10278	Santa Cruz do Capibaribe	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,10391
Cha Grande	Cultivo de milho	0,00236	São Joaquim do Monte	Cultivo de milho	0,00485
Cha Grande	Outros da fruticultura	0,00373	São Joaquim do Monte	Outros da fruticultura	0,00414
Cha Grande	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00634	São Joaquim do Monte	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00473
Cortes	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00143	São Joaquim do Monte	Pecuária	0,17124
Cortes	Outros da fruticultura	0,00377	São Lourenço da Mata	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00618
Cortes	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00361	São Lourenço da Mata	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,11911
Cortes	Fabricação de álcool	0,06848	São Lourenço da Mata	Transporte terrestre	0,09152
Cupira	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00529	Sirinhaem	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00278
Escada	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00183	Sirinhaem	Pecuária	0,17124
Escada	Fabricação e refino de açúcar	0,08268	Sirinhaem	Pesca e Aquicultura	0,07021
Escada	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,14152	Sirinhaem	Fabricação e refino de açúcar	0,08268
Escada	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,10391	Sirinhaem	Transporte terrestre	0,09152
Escada	Construção	0,10087	Tamandaré	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00174

Gameleira	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00152	Tamandaré	Pesca e Aquicultura	0,07021
Gameleira	Fabricação e refino de açúcar	0,08268	Tamandaré	Fabricação e refino de açúcar	0,08268
Gameleira	Construção	0,10087	Tamandaré	Educação	0,09567
Gravata	Cultivo de milho	0,00428	Taquaritinga do Norte	Pecuária	0,17124
Gravata	Outros da fruticultura	0,00386	Toritama	Fabricação de produtos têxteis	0,09990
Gravata	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00501	Toritama	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	0,10391
Ibirajuba	Pecuária	0,17124	Toritama	Construção	0,10087
Ipojuca	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00133	Tracunhaém	Cultivo de milho	0,00165
Ipojuca	Pesca e Aquicultura	0,07021	Tracunhaém	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00180
Ipojuca	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,08158	Tracunhaém	Cultivo de plantas de lavoura não especificadas anteriormente	0,00533
Ipojuca	Fabricação e refino de açúcar	0,08268	Vitoria de Santo Antão	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00417
Ipojuca	Fabricação de produtos petroquímicos básicos	0,11814	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de produtos têxteis	0,09990
Ipojuca	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,12122	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de álcool	0,06848
Ipojuca	Resíduos	0,09004	Xexéu	Cultivo de cana-de-açúcar	0,00188
Ipojuca	Construção	0,10087	Xexéu	Construção	0,10087
Ipojuca	Transporte terrestre	0,09152			

Tabela 27: Valores da elasticidade de produção com relação a variação da água tratada para as regiões e setores econômicos que utilizam a água tratada na área de estudo. Fonte: Viana (2019).

Regiões	Setor econômico	Elasticidade de produção com relação a variação da água tratada	Regiões	Setor econômico	Elasticidade de produção com relação a variação da água tratada
Agregado Jucazinho	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Joaquim Nabuco	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Jucazinho	Comércio varejista	0,14271	Joaquim Nabuco	Saúde	0,13088
Agregado Jucazinho	Alojamento	0,13218	Jucati	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Jucazinho	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Jupi	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Jucazinho	Atividades de vigilância...	0,12146	Jupi	Saúde	0,13088
Agregado Jucazinho	Educação	0,13899	Jurema	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Jucazinho	Saúde	0,13088	Jurema	Saúde	0,13088
Agregado Jucazinho	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Lagoa do Carro	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Agregado Bitury	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Lagoa do Carro	Atividades de vigilância...	0,12146

Agregado Bitury	Comércio varejista	0,14271	Lagoa do Carro	Saúde	0,13088
Agregado Bitury	Atividades de vigilância...	0,12146	Lagoa do Itaenga	Fabricação e refino de açúcar	0,13918
Agregado Bitury	Educação	0,13899	Lagoa do Itaenga	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Agregado Bitury	Saúde	0,13088	Lagoa do Itaenga	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Bitury	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Lagoa do Itaenga	Saúde	0,13088
Agregado Caetés/ Capoeiras	Atividades de vigilância...	0,12146	Lagoa dos Gatos	Atividades de vigilância...	0,12146
Agregado Caetés/ Capoeiras	Educação	0,13899	Lagoa dos Gatos	Saúde	0,13088
Agregado Caetés/ Capoeiras	Saúde	0,13088	Lajedo	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142
Agrestina	Atividades de vigilância...	0,12146	Lajedo	Comércio varejista	0,14271
Agrestina	Educação	0,13899	Lajedo	Atividades de vigilância...	0,12146
Agrestina	Saúde	0,13088	Lajedo	Educação	0,13899
Água Preta	Água e esgoto	0,12078	Lajedo	Saúde	0,13088
Água Preta	Atividades de vigilância...	0,12146	Limoeiro	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Água Preta	Educação	0,13899	Limoeiro	Comércio varejista	0,14271
Água Preta	Saúde	0,13088	Limoeiro	Atividades de vigilância...	0,12146
Altinho	Atividades de vigilância...	0,12146	Limoeiro	Educação	0,13899
Altinho	Saúde	0,13088	Limoeiro	Saúde	0,13088
Amaraji	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,12434	Limoeiro	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947
Amaraji	Atividades de vigilância...	0,12146	Maraial	Atividades de vigilância...	0,12146
Amaraji	Saúde	0,13088	Moreno	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,12434
Arcoverde	Comércio varejista	0,14271	Moreno	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,12053

Arcoverde	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,12964	Moreno	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Arcoverde	Alojamento	0,13218	Moreno	Comércio varejista	0,14271
Arcoverde	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Moreno	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Arcoverde	Atividades de vigilância...	0,12146	Moreno	Atividades de vigilância...	0,12146
Arcoverde	Educação	0,13899	Moreno	Educação	0,13899
Arcoverde	Saúde	0,13088	Moreno	Saúde	0,13088
Arcoverde	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Moreno	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947
Barra de Guabiraba	Fabricação de bebidas não alcoólicas	0,12742	Palmares	Água e esgoto	0,12078
Barra de Guabiraba	Atividades de vigilância...	0,12146	Palmares	Comércio varejista	0,14271
Barra de Guabiraba	Saúde	0,13088	Palmares	Atividades de vigilância...	0,12146
Barreiros	Comércio varejista	0,14271	Palmares	Educação	0,13899
Barreiros	Atividades de vigilância...	0,12146	Palmares	Saúde	0,13088
Barreiros	Educação	0,13899	Palmares	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947
Barreiros	Saúde	0,13088	Panelas	Atividades de vigilância...	0,12146
Barreiros	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Panelas	Educação	0,13899
Belem de Maria	Atividades de vigilância...	0,12146	Panelas	Saúde	0,13088
Belo Jardim	Abate de animais exceto pescado	0,14183	Paudalho	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de	0,13061

				minerais não-metálicos	
Belo Jardim	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142	Paudalho	Comércio varejista	0,14271
Belo Jardim	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Paudalho	Atividades de vigilância...	0,12146
Belo Jardim	Metalurgia de metais não ferrosos	0,10102	Paudalho	Educação	0,13899
Belo Jardim	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,14093	Paudalho	Saúde	0,13088
Belo Jardim	Comércio varejista	0,14271	Poção	Atividades de vigilância...	0,12146
Belo Jardim	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Poção	Saúde	0,13088
Belo Jardim	Atividades de vigilância...	0,12146	Pombos	Comércio varejista	0,14271
Belo Jardim	Educação	0,13899	Pombos	Atividades de vigilância...	0,12146
Belo Jardim	Saúde	0,13088	Pombos	Saúde	0,13088
Belo Jardim	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Primavera	Atividades de vigilância...	0,12146
Bezerros	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Primavera	Saúde	0,13088
Bezerros	Comércio varejista	0,14271	Quipapá	Atividades de vigilância...	0,12146
Bezerros	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Quipapá	Educação	0,13899
Bezerros	Atividades de vigilância...	0,12146	Quipapá	Saúde	0,13088
Bezerros	Educação	0,13899	Recife	Extração de minerais, exceto petróleo e gás natural	0,13867
Bezerros	Saúde	0,13088	Recife	Preservação do pescado e	0,13971

				fabricação de produtos do pescado	
Bezerros	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Recife	Laticínios e Outros produtos alimentares	0,14414
Bonito	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Beneficiamento de produtos vegetais	0,14128
Bonito	Educação	0,13899	Recife	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,12434
Bonito	Saúde	0,13088	Recife	Fabricação de bebidas não alcoólicas	0,12742
Brejo da Madre de Deus	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Fabricação de produtos da madeira	0,13782
Brejo da Madre de Deus	Educação	0,13899	Recife	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,12920
Brejo da Madre de Deus	Saúde	0,13088	Recife	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,12053
Calçado	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	0,12994
Camaragibe	Fabricação de bebidas não alcoólicas	0,12742	Recife	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	0,13616
Camaragibe	Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e de produtos e preparados químicos diversos	0,12994	Recife	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	0,13556
Camaragibe	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Recife	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142
Camaragibe	Comércio varejista	0,14271	Recife	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Camaragibe	Alimentação	0,14184	Recife	Fabricação de cimento	0,08160
Camaragibe	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	0,13567	Recife	Produção de ferro-gusa/ferroligas,	0,09382

	e atividades administrativas e serviços complementares			siderurgia e tubos de aço sem costura	
Camragibe	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Metalurgia de metais não ferrosos	0,10102
Camragibe	Educação	0,13899	Recife	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,14187
Camragibe	Saúde	0,13088	Recife	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,14093
Camragibe	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Recife	Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos	0,14186
Camocim de São Felix	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores	0,13204
Camocim de São Felix	Saúde	0,13088	Recife	Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas	0,14875
Canhotinho	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	0,15168
Canhotinho	Saúde	0,13088	Recife	Geração de energia elétrica	0,13444
Carpina	Fabricação de alimentos para animais	0,13626	Recife	Distribuição de energia elétrica	0,13541
Carpina	Fundição e Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	0,14187	Recife	Água e esgoto	0,12078
Carpina	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	0,14309	Recife	Resíduos	0,13799
Carpina	Comércio varejista	0,14271	Recife	Construção	0,15006
Carpina	Alimentação	0,14184	Recife	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	0,14309
Carpina	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e	0,13567	Recife	Comércio atacadista	0,13412

	serviços complementares				
Carpina	Atividades de vigilância...	0,12146	Recife	Comércio varejista	0,14271
Carpina	Educação	0,13899	Recife	Transporte terrestre	0,14112
Carpina	Saúde	0,13088	Recife	Transporte dutoviário de carga	0,12121
Carpina	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Recife	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,12964
Caruaru	Laticínios e Outros produtos alimentares	0,14414	Recife	Alojamento	0,13218
Caruaru	Fabricação de bebidas não alcoólicas	0,12742	Recife	Alimentação	0,14184
Caruaru	Fabricação de produtos têxteis	0,14450	Recife	Edição e edição integrada à impressão	0,13750
Caruaru	Confeção de artefatos do vestuário e acessórios	0,15760	Recife	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem, Telecomunicações e Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	0,13909
Caruaru	Fabricação de celulose, fabricação de papel e artefatos de papel	0,12920	Recife	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	0,13683
Caruaru	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142	Recife	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Caruaru	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Recife	Atividades de vigilância...	0,12146
Caruaru	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	0,09382	Recife	Educação	0,13899
Caruaru	Metalurgia de metais não ferrosos	0,10102	Recife	Saúde	0,13088
Caruaru	Resíduos	0,13799	Recife	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços	0,13947

				pessoais Serviços domésticos	
Caruaru	Construção	0,15006	Ribeirão	Comércio varejista	0,14271
Caruaru	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	0,14309	Ribeirão	Atividades de vigilância...	0,12146
Caruaru	Comércio atacadista	0,13412	Ribeirão	Educação	0,13899
Caruaru	Comércio varejista	0,14271	Ribeirão	Saúde	0,13088
Caruaru	Transporte terrestre	0,14112	Rio Formoso	Fabricação e refino de açúcar	0,13918
Caruaru	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,12964	Rio Formoso	Atividades de vigilância, segurança, investigação e segurança pública, Defesa e Outros da administração pública e seguridade social	0,12146
Caruaru	Alojamento	0,13218	Rio Formoso	Educação	0,13899
Caruaru	Alimentação	0,14184	Rio Formoso	Saúde	0,13088
Caruaru	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	0,13683	Saire	Atividades de vigilância...	0,12146
Caruaru	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Saire	Saúde	0,13088
Caruaru	Atividades de vigilância...	0,12146	Santa Cruz do Capibaribe	Comércio atacadista	0,13412
Caruaru	Educação	0,13899	Santa Cruz do Capibaribe	Comércio varejista	0,14271
Caruaru	Saúde	0,13088	Santa Cruz do Capibaribe	Alimentação	0,14184
Caruaru	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Santa Cruz do Capibaribe	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Catende	Água e esgoto	0,12078	Santa Cruz do Capibaribe	Atividades de vigilância...	0,12146
Catende	Atividades de vigilância...	0,12146	Santa Cruz do Capibaribe	Educação	0,13899
Catende	Educação	0,13899	Santa Cruz do Capibaribe	Saúde	0,13088
Catende	Saúde	0,13088	Santa Cruz do Capibaribe	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	0,13947

				Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	
Cha de Alegria	Atividades de vigilância...	0,12146	São Benedito do Sul	Atividades de vigilância...	0,12146
Cha de Alegria	Saúde	0,13088	São Caitano	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Cha Grande	Atividades de vigilância...	0,12146	São Caitano	Atividades de vigilância...	0,12146
Cha Grande	Educação	0,13899	São Caitano	Educação	0,13899
Cha Grande	Saúde	0,13088	São Caitano	Saúde	0,13088
Cortes	Atividades de vigilância...	0,12146	São Joaquim do Monte	Atividades de vigilância...	0,12146
Cortes	Saúde	0,13088	São Joaquim do Monte	Saúde	0,13088
Cupira	Atividades de vigilância...	0,12146	São Jose da Coroa Grande	Alimentação	0,14184
Cupira	Educação	0,13899	São Jose da Coroa Grande	Atividades de vigilância...	0,12146
Cupira	Saúde	0,13088	São Jose da Coroa Grande	Saúde	0,13088
Escada	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,12434	São Lourenço da Mata	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Escada	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142	São Lourenço da Mata	Fabricação de outras máquinas e equipamentos elétricos	0,14093
Escada	Comércio varejista	0,14271	São Lourenço da Mata	Construção	0,15006
Escada	Atividades de vigilância...	0,12146	São Lourenço da Mata	Comércio varejista	0,14271
Escada	Educação	0,13899	São Lourenço da Mata	Transporte terrestre	0,14112
Escada	Saúde	0,13088	São Lourenço da Mata	Atividades de vigilância...	0,12146
Feira Nova	Atividades de vigilância...	0,12146	São Lourenço da Mata	Educação	0,13899
Feira Nova	Saúde	0,13088	São Lourenço da Mata	Saúde	0,13088
Gameleira	Atividades de vigilância...	0,12146	Sirinhaem	Fabricação e refino de açúcar	0,13918
Gameleira	Saúde	0,13088	Sirinhaem	Comércio varejista	0,14271

Gloria do Goitá	Atividades de vigilância...	0,12146	Sirinhaem	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Gloria do Goitá	Educação	0,13899	Sirinhaem	Atividades de vigilância...	0,12146
Gloria do Goitá	Saúde	0,13088	Sirinhaem	Educação	0,13899
Gravata	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142	Sirinhaem	Saúde	0,13088
Gravata	Comércio varejista	0,14271	Tamandaré	Fabricação e refino de açúcar	0,13918
Gravata	Alojamento	0,13218	Tamandaré	Alojamento	0,13218
Gravata	Alimentação	0,14184	Tamandaré	Alimentação	0,14184
Gravata	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Tamandaré	Atividades de vigilância...	0,12146
Gravata	Atividades de vigilância...	0,12146	Tamandaré	Educação	0,13899
Gravata	Educação	0,13899	Tamandaré	Saúde	0,13088
Gravata	Saúde	0,13088	Taquaritinga do Norte	Atividades de vigilância...	0,12146
Gravata	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Taquaritinga do Norte	Educação	0,13899
Ibirajuba	Atividades de vigilância...	0,12146	Taquaritinga do Norte	Saúde	0,13088
Ipojuca	Fabricação e refino de açúcar	0,13918	Toritama	Comércio varejista	0,14271
Ipojuca	Fabricação de óleos e gorduras vegetais e animais	0,13440	Toritama	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Ipojuca	Fabricação de produtos petroquímicos básicos	0,12014	Toritama	Atividades de vigilância...	0,12146
Ipojuca	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,12053	Toritama	Educação	0,13899
Ipojuca	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	0,13616	Toritama	Saúde	0,13088

Ipojuca	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142	Toritama	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947
Ipojuca	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061	Tracunhaém	Atividades de vigilância...	0,12146
Ipojuca	Fabricação de tratores e de máquinas e equipamentos mecânicos	0,14186	Venturosa	Atividades de vigilância...	0,12146
Ipojuca	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	0,13143	Venturosa	Saúde	0,13088
Ipojuca	Construção	0,15006	Vitoria de Santo Antão	Laticínios e Outros produtos alimentares	0,14414
Ipojuca	Comércio atacadista	0,13412	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de bebidas alcoólicas	0,12434
Ipojuca	Comércio varejista	0,14271	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de produtos químicos, resinas e elastômeros	0,12053
Ipojuca	Transporte terrestre	0,14112	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	0,13142
Ipojuca	Transporte dutoviário de carga	0,12121	Vitoria de Santo Antão	Fabricação de vidro e de produtos do vidro e outros produtos de minerais não-metálicos	0,13061
Ipojuca	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,12964	Vitoria de Santo Antão	Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	0,09382
Ipojuca	Alojamento	0,13218	Vitoria de Santo Antão	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	0,14309
Ipojuca	Alimentação	0,14184	Vitoria de Santo Antão	Comércio atacadista	0,13412
Ipojuca	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567	Vitoria de Santo Antão	Comércio varejista	0,14271

Ipojuca	Atividades de vigilância...	0,12146	Vitoria de Santo Antão	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes e correios	0,12964
Ipojuca	Educação	0,13899	Vitoria de Santo Antão	Alimentação	0,14184
Ipojuca	Saúde	0,13088	Vitoria de Santo Antão	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas e atividades administrativas e serviços complementares	0,13567
Ipojuca	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947	Vitoria de Santo Antão	Atividades de vigilância...	0,12146
Jaqueira	Atividades de vigilância...	0,12146	Vitoria de Santo Antão	Educação	0,13899
Jaqueira	Saúde	0,13088	Vitoria de Santo Antão	Saúde	0,13088
Jataúba	Atividades de vigilância...	0,12146	Vitoria de Santo Antão	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos Organizações associativas e outros serviços pessoais Serviços domésticos	0,13947
Jataúba	Saúde	0,13088	Xexéu	Atividades de vigilância...	0,12146
Joaquim Nabuco	Fabricação e refino de açúcar	0,13918	Xexéu	Saúde	0,13088

APÊNDICE D

Abaixo está o código do modelo de alocação de água em GAMS. A solução, exportação de resultados, extração dos dados (de demanda e oferta) e as limitações e restrições utilizadas não foram incluídas devido ao espaço ocupado.

*criação do conjunto n de nós $n = \{\text{Supply_1, Supply_2, ..., Nodemanda_1, Nodemanda_2, ...}\}$

SET n nodes

*Capibaribe

Supply_1*Supply_25,

*Ipojuca

Supply_26*Supply_31,

*Una

Supply_32*Supply_43,

*Sirinhaém

Supply_44*Supply_48,

*Capibaribe

Nodemanda_1*Nodemanda_67,

*Ipojuca

Nodemanda_68*Nodemanda_121,

*Una

Nodemanda_185*Nodemanda_273,

*Sirinhaém

Nodemanda_122*Nodemanda_184,

*Capibaribe

Inflow19606, Inflow19607, Inflow20021, Inflow10407, Inflow10409, Inflow10410, Inflow17608, Inflow10412,

*Ipojuca

Inflow10414, Inflow9606,

*Una

Inflow10415, Inflow13207, Inflow13206, Inflow12806, Inflow13607,

*Sirinhaém

Inflow14010, Inflow14011,

*Capibaribe

Reservoir5606, Reservoir5210, Reservoir7205, Reservoir7604, Reservoir7605, Stream24009, Reservoir7607, Reservoir7608, Reservoir7603, Reservoir7606, Reservoir7204, Reservoir7207, Stream33622, Stream9205, Stream9206, Stream33628, Stream22411, Stream33630, Stream22413, Stream34015, Stream9207, Stream34411, Stream8808, Stream27626, Stream22814,

*Ipojuca

Reservoir5208, Stream35611, Stream15605, Stream10805, Reservoir6803, Stream8405,

*Una

Reservoir8803, Stream25618, Reservoir8403, Stream25620, Reservoir8004, Reservoir8003, Stream22009, Stream26810, Stream11605, Stream10005, Stream12005, Stream25617,

*Sirinhaém

Stream16805, Stream12809, Reservoir14405, Stream29233, Stream29612

*-----

*código para criar um conjunto nl de nós igual a n

ALIAS(n,n1);

*-----

*São subconjuntos do conjunto de n nós, nn, ns, nr, nl são subconjuntos

SET

nn(n) Simple nodes /

*Capibaribe

Stream33622, Stream9205, Stream9206, Stream33628, Stream22411, Stream33630, Stream22413, Stream34015,
Stream9207, Stream34411, Stream8808, Stream27626, Stream22814,

*Ipojuca

Stream35611, Stream15605, Stream10805, Stream8405,

*Una

Stream25618, Stream25620, Stream22009, Stream26810, Stream11605, Stream10005, Stream12005, Stream25617,

*Sirinhaém

Stream16805, Stream12809, Stream29233, Stream29612

ns(n) Supply nodes /

*Capibaribe

Supply_1*Supply_25,

*Ipojuca

Supply_26*Supply_31,

*Una

Supply_32*Supply_43,

*Sirinhaém

Supply_44*Supply_48

ni(n) Inflow node /

*Capibaribe

Inflow19606, Inflow19607, Inflow20021, Inflow10407, Inflow10409, Inflow10410, Inflow17608, Inflow10412,

*Ipojuca

Inflow10414, Inflow9606,

*Una

Inflow10415, Inflow13207, Inflow13206, Inflow12806, Inflow13607,

*Sirinhaém

Inflow14010, Inflow14011

nr(n) Water user nodes /

*Capibaribe

Nodemanda_1*Nodemanda_67,

*Ipojuca

Nodemanda_68*Nodemanda_121,

*Una

Nodemanda_185*Nodemanda_273,

*Sirinhaém

Nodemanda_122*Nodemanda_184

nra(n) nós de abastecimento público /

*Capibaribe

Nodemanda_1, Nodemanda_3, Nodemanda_4, Nodemanda_8, Nodemanda_10, Nodemanda_12, Nodemanda_14, Nodemanda_17, Nodemanda_24, Nodemanda_27, Nodemanda_29, Nodemanda_36, Nodemanda_38, Nodemanda_52, Nodemanda_58, Nodemanda_60,

*Ipojuca

Nodemanda_71, Nodemanda_74, Nodemanda_78, Nodemanda_83, Nodemanda_88, Nodemanda_96, Nodemanda_100, Nodemanda_103, Nodemanda_107, Nodemanda_113, Nodemanda_117,

*Una

Nodemanda_190, Nodemanda_191, Nodemanda_193, Nodemanda_194, Nodemanda_197, Nodemanda_218, Nodemanda_220, Nodemanda_223, Nodemanda_229, Nodemanda_233, Nodemanda_236, Nodemanda_237, Nodemanda_241, Nodemanda_250, Nodemanda_259, Nodemanda_265, Nodemanda_267, Nodemanda_273,

*Sirinhaém

Nodemanda_136, Nodemanda_138, Nodemanda_142, Nodemanda_145, Nodemanda_151, Nodemanda_158, Nodemanda_163, Nodemanda_168, Nodemanda_169, Nodemanda_175, Nodemanda_183

nrs(n) nós de demanda utilizados para encontrar solução ótima do cenário atual/

Nodemanda_1*Nodemanda_273

*-----

EQUATIONS

$R_{no}(n,t)$	Nós do tipo stream
$R_{ns}(n,t)$	Aporte da bacia incremental
$R_{ni}(n,t)$	Nós do tipo inflow
$R_{re}(n,t)$	Nós do tipo reservoir
$R_{nn}(n,t)$	Nós de oferta

Objective;

*-----

* Para os nós do tipo stream a liberação (*release*) iguala o fluxo de água

$R_{no}(n,t) = R_{nn}(n,t) = Q(n,t)$;

*Para os nós do tipo inflow não existe liberação de água

$R_{ni}(n,t) \text{ (ni(n))} \dots R(n,t) = 0;$

* A equação abaixo representa o aporte da bacia incremental

$R_{ns}(n,t) \text{ (ns(n))} \dots R(n,t) = \text{Supply}(n,t);$

*Equação dos nós do tipo reservoir

$R_{re}(n,t) \text{ (nre(n))} \dots S(n,t) = \text{beg_S}(n) \text{ (ord(t) EQ 1)} + S(n,t-1) \text{ (ord(t) GT 1)} + Q(n,t) - R(n,t);$

*Fluxo de água dos nós de oferta, soma dos aportes menos a soma das demandas

$R_{nn}(n,t) \text{ (nof(n))} \dots Q(n,t) = \sum(n1 \text{ (n_from_n(n,n1))}, R(n1,t))$
 $- \sum(n1 \text{ (n_to_nr(n,n1))}, \text{Nodemanda}(n1,t));$

*Objetivo é aproximar ao máximo a água alocada em cada nó de demanda a demanda requerida.

$\text{objective} \dots \text{obj} = \sum(t, \sum(n \text{ (nr(n))}, \text{Nodemanda}(n,t)));$

*-----

MODEL quatrobacias /all/;

SOLVE quatrobacias USING LP MAXIMIZING obj;