



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

RAPHAEL CAPUZI FREIRE

**RELAÇÕES BILATERAIS DE USO E CONSERVAÇÃO
DA ÁGUA, ENERGIA E BIOMASSA NA BACIA DO
RIO ATIBAIA**

CAMPINAS

2020

RAPHAEL CAPUZI FREIRE

**RELAÇÕES BILATERAIS DE USO E CONSERVAÇÃO
DA ÁGUA, ENERGIA E BIOMASSA NA BACIA DO
RIO ATIBAIA**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de Recursos hídricos energéticos e ambientais.

Orientador: Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO RAPHAEL CAPUZI FREIRE E ORIENTADO PELO PROF. DR. JOSÉ ANDERSON DO NASCIMENTO BATISTA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Freire, Raphael Capuzi, 1992-

F883r Relações bilaterais de uso e conservação da água, energia e biomassa na
bacia do rio Atibaia / Raphael Capuzi Freire. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: José Anderson do Nascimento Batista.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Modelos hidrológicos. 2. Água - Conservação. 3. Bacias hidrográficas -
Atibaia, Rio (SP). 4. Abastecimento de água - Atibaia, Rio (SP). I. Batista, José
Anderson do Nascimento, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Bilateral relationships of water, energy and biomass use
and conservations in the Atibaia river basin

Palavras-chave em inglês:

Hydrological models

Water - Conservation

Hydrographic basins - Atibaia, Rio (SP)

Water supply - Atibaia, River

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

José Anderson do Nascimento Batista [Orientador]

Alberto Luiz Francato

Sabine Schluter

Data de defesa: 14-08-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**RELAÇÕES BILATERAIS DE USO E CONSERVAÇÃO DA
ÁGUA, ENERGIA E BIOMASSA NA BACIA DO RIO ATIBAIA**

Raphael Capuzi Freire

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Alberto Luiz Francato
Universidade Estadual de Campinas

Profa. Dra. Sabine Schlüter
University of Applied Sciences

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 14 de agosto de 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família,
Minha esposa, Mariana,
Meus pais, João e Ivanilda,
Meu irmão, Felipe

EPÍGRAFE

“Mas a vereda dos justos é como a luz da aurora, que vai brilhando mais e mais até ser dia perfeito. ” Provérbios 4:18

AGRADECIMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (01-P-03713/2017).

Ao Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista, pela orientação, paciência e ensinamentos que muito contribuiu para a conclusão desta dissertação.

À minha esposa, Mariana, por ser minha eterna companheira de caminhada, me alegrando, estimulando e constantemente me lembrando de que sou capaz nos meus dias mais difíceis.

Aos meus pais, João e Ivanilda, por estarem sempre ao meu lado me apoiando em cada escolha, por mais difíceis que sejam.

Ao meu irmão, Felipe, por todo cuidado e por estar sempre em prontidão para me ajudar.

A todos os meus amigos, em especial Marcelo e família que sempre estiveram lá para me abrigar e compartilhar os momentos mais difíceis desta jornada.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste mestrado, meu sincero obrigado.

RESUMO

Devido a importância da água para o abastecimento humano e a sustentabilidade ambiental, bem como a sua presença em vários processos produtivos, a demanda por água é conflitante em regiões que apresentam uma grande concentração urbana ou desenvolvimento econômico. A bacia hidrográfica do rio Atibaia tem diferentes usos para a água, entre eles os usos agrícolas e industriais. Apresenta, ainda, a região metropolitana de Campinas, contribuindo para o abastecimento de cerca de 2,5 milhões de pessoas. O presente trabalho tem o objetivo de mapear os possíveis cenários de conflitos causados pelo uso da água, quantificar o balanço hidrológico, alimentar e energético utilizando-se de modelos hidrológicos e por fim analisar as relações de interdependência entre água, alimento e energia a fim de auxiliar nas soluções para os problemas relacionados ao uso e demanda hídrica. Observou-se que para a região de Itatiba e Atibaia (cabeceira) no ano de 2018 foram utilizados 92% e 88% respectivamente da vazão de referência Q_{95} para suprir as demandas outorgadas e 50% nos trechos médio e baixo do rio (Campinas e Paulínia). Para o cenário com matriz energética renovável, verificou-se um acréscimo de cerca de 250% na demanda de energia elétrica, e 400% para a demanda de etanol para o ano de 2030. O maior consumo não se reverte em maior produtividade hídrica. Pois entre Itatiba e Atibaia ocorrem a menor produtividade da bacia, com 35 kg de alimento por metro cúbico de água, representando uma produtividade 6 vezes menor, comparado às regiões mais eficientes como a de Campinas e Paulínia. Por meio da análise de envoltória de dados, observou-se que entre os anos de 2020 e 2030 as demandas por recursos hídricos poderão dobrar se forem mantidos os padrões de consumo energético atual, e que para o cenário com redução no consumo de combustíveis fósseis e acréscimo da utilização de etanol tal demanda poderá aumentar apenas em 40%.

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica, Disponibilidade Hídrica, Água-Alimento-Energia.

ABSTRACT

Due to the importance of water for human supply and environmental sustainability, as well as its presence in various production processes, the water demand is conflicting in regions with an elevated urban concentration or economic development. The Atibaia river basin presents many different uses for water, among which the agricultural and industrial uses. It also presents the metropolitan region of Campinas, contributing to the supply of approximately 2.5 million people. The present study intends to map the possible scenarios of conflicts caused by the use of water, quantify the hydrological, food and energy balance using hydrological models and finally analyze the interdependence relationships between water, food and energy in order to assist in solutions to problems related to water use and demand. It was observed that for the Itatiba and Atibaia region (headwater) in 2018, 92% and 88% of the reference flow Q_{95} are used respectively to meet the demands granted and 50% in the middle and low parts of the river (Campinas and Paulínia). For the renewable energy matrix scenario in 2030 there was an increase of 250% in the demand for electricity, and 400% in the demand for ethanol. The higher consumption does not return as the higher water productivity. For between Itatiba and Atibaia the lower productivity of the basin occurs, producing 35kg of food per m^3 of water, representing a six time lower productivity if compared to the more efficient regions such as Campinas. Through the data envelopment analysis, it was observed that between 2020 and 2030 the demands for water resources may double if the current energy consumption patterns are maintained, and that for the scenario with reduced consumption of fossil fuels and increase of ethanol, such demand may increase only by 40%.

Keywords – Hydrological Modeling, Water Availability, Water-Food-Energy Nexus

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relações de interdependência entre água energia e alimento	20
Figura 2: Municípios abastecidos pela bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	28
Figura 3: Rios Atibainha, Atibaia e Cachoeira	29
Figura 4: Pontos de captação de água na bacia hidrográfica do rio Atibaia	30
Figura 5 Captações outorgadas para a bacia hidrográfica do Rio Atibaia	30
Figura 6: Mapa pedológico da bacia hidrográfica do rio Atibaia	32
Figura 7: Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Atibaia	33
Figura 8: Representação modelagem hidrológica	34
Figura 9: Representação modelagem energética	35
Figura 10: Representação procedimento utilizado para a identificação das relações de interdependência	35
Figura 11: Modelo de cadeia energética	42
Figura 12: Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos	48
Figura 13: Modelo digital de elevação hidrológicamente consistente da bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	49
Figura 14: Passos seguidos durante modelagem energética	540
Figura 15: Valores de t-stat e p-val modelos SWAT e CWATM.....	54
Figura 16: Hietograma, vazões simuladas e observadas – a) posto Paulínia, b)Posto Valinhos, c) Posto Itatiba, d) Posto Atibaia.....	562
Figura 17: Dispersão das séries simuladas de vazão para os postos fluviométricos analisados para os períodos de calibração e validação, a1)posto Paulínia calibração, b) posto Valinhos calibração, c) posto Itatiba calibração, d) posto Atibaia calibração, a2) posto Paulínia validação, b2) posto Valinhos validação, c2) posto Itatiba validação, d2) posto Atibaia validação	642
Figura 18: Curvas de permanência, a1) posto Paulínia calibração, b1) posto Valinhos calibração, c1) Posto Itatiba calibração, d1) posto Atibaia calibração, a2) posto Paulínia validação, b2) posto Valinhos validação, c2) posto Itatiba validação, d2) posto Atibaia validação	64
Figura 19: . Produtividade hídrica : (a) sub-bacias, (b) evapotranspiração anual, (c) produção cana de açúcar e pastagem t/ha, (d) produtividade hídrica kg/m³.....	67
Figura 20: Produtividade hídrica 2030 : (a) sub-bacias, (b) evapotranspiração anual, (c) produção cana de açúcar e pastagem t/ha, (d) produtividade hídrica kg/m³	68

Figura 21: Consumo médio TWh/ano.....	69
Figura 22: Demanda derivados do petróleo e etanol TWh/ano.....	71
Figura 23: Cadeia energética	73
Figura 24: Demanda eletricidade	74
Figura 25: Demanda por derivados de petróleo e etanol TWh/ano	75
Figura 26: Porcentagem demanda por combustíveis	76
Figura 27: Demanda por gás natural TWh/ano.....	76
Figura 28: Eficiência demandas atuais e futuras	78
Figura 29: Análise tendências	79
Figura 30: Comparação envoltórias de dados, somatório das demandas por água nos 2 cenários estudados	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais tipos de uso e ocupação do solo na Bacia hidrográfica do rio Atibaia.....	34
Tabela 2:Dados para a aplicação do modelo SWAT	38
Tabela 3:Entradas e Saídas Análise de envoltória de dados.....	45
Tabela 4:Postos pluviométricos e hidrometeorológicos	47
Tabela 5:Parâmetros selecionados, significado e processos relacionados, modelo SWAT	53
Tabela 6:Parâmetros selecionados, significado e processos relacionados, modelo CWATM	53
Tabela 7:resultados funções objetivo	57
Tabela 8:Coeficiente de variação posto fluviométrico de Paulínia	59
Tabela 9: Coeficientes de Nash, R^2 e PBIAS para o posto fluviométrico de Paulínia	60
Tabela 10:% Vazão Q95 e Somatório das Demandas	65
Tabela 11:projeções demandas e vazões referência	66
Tabela 12:projeções demandas eletricidade	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Relações de interdependência entre usos de água energia e alimento	18
3.1.1. Definição	18
3.1.2. Classificação das interdependências	19
3.1.3. Água e Energia.....	21
3.1.4. Energia e Alimento	22
3.1.5. Alimento e Água	24
4. Área de Estudo	25
4.1. A Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí	25
4.1.1. A bacia hidrográfica do rio Atibaia	27
4.1.1.1. Características físicas da Bacia Hidrográfica do Rio Atibaia	31
4.1.1.2. O uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Atibaia	32
5. Materiais e métodos.....	34
5.1. Representação Metodológica.....	34
5.2. Modelos hidrológicos	36
5.3. Balanço hídrico e alimentar	37
5.4. Calibração e validação dos modelos	40
5.5. Balanço energético	41
5.6. Análise de Envoltória de Dados	43
5.6.1. Variáveis de avaliação.....	45
5.7. Dados utilizados.....	46
5.7.1. Dados de entrada utilizados nos modelos SWAT e CWATM.....	46

5.7.1.1.	Dados Atmosféricos	46
5.7.1.2.	Modelo digital de elevação do terreno	48
5.7.2.	Dados de entrada utilizados no modelo MESSAGE	49
5.7.2.1.	Cenários utilizados para a modelagem energética	50
6.	Resultados e discussão	51
6.1.	Análise de Sensibilidade dos modelos hidrológicos	52
6.2.	Resultados do Balanço Hídrico	55
6.3.	Balanço Alimentar	66
6.4.	Balanço energético	69
6.4.1.	Energia elétrica.....	69
6.4.1.1.	Derivados do petróleo e etanol.....	70
6.4.2.	Cadeia energética modelo MESSAGE	72
6.4.3.	Demanda elétrica	74
6.4.4.	Demanda por derivados de petróleo e etanol	75
6.5.	Análise envoltória de dados	77
7.	Conclusões	81
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Atibaia participa ativamente do abastecimento de grandes centros urbanos como a região metropolitana de Campinas (RMC) e a região metropolitana de São Paulo (RMSP), abastecendo 23 municípios, e apresentando ainda um diversificado parque industrial e polo agrícola que refletem diretamente em sua demanda por recursos hídricos. O elevado consumo de água em relação à disponibilidade hídrica resulta na diminuição dos escoamentos dos rios, que são principalmente afetados durante os períodos de estiagem. Scanlon et al. (2017), afirma que, em uma escala global, a produção alimentícia é uma atividade que consome uma quantidade considerável de água, correspondendo a cerca de 70% consumo de água potável devido à perda por evapotranspiração, e 90% do uso global, o que pode impactar a demanda de água em países altamente produtores, como o Brasil. Segundo Sánchez-Román, Folegatti e Orellana-González (2009) o consumo exacerbado e incontrolado dos recursos hídricos aliado ao crescimento populacional implica em um aumento substancial da demanda por alimento e na contaminação de corpos de hídricos. O acréscimo da demanda por recursos hídricos causa impactos diretos nos próprios usuários que, por sua vez, sofrem devido à falta de água durante os períodos de seca, resultando em diminuições nas lavouras e afetando suas comunidades. Tal contexto mostra que existe uma relação de interdependência entre o consumo, disponibilidade hídrica e as produções alimentícias (SÁNCHEZ-ROMÁN; FOLEGATTI; ORELLANA-GONZÁLEZ, 2009)

Com base nesta relação de interdependência, a modelagem hidrológica se faz extremamente importante podendo com sua devida aplicação, equacionar o consumo e disponibilidade hídrica, e a produção energética e alimentar, como é demonstrado no estudo de Zhang et al. (2018) constatou que a irrigação das lavouras de milho em Nebraska por meio de pivôs centrais foi responsável por um acréscimo de 80% no consumo hídrico da região em época de estiagem e que tal consumo não se reverteu em um acréscimo da produtividade agrícola, sendo observada uma redução na produção de 3t/ha.

Gao et al. (2018), utilizando-se também da modelagem hidrológica, demonstrou as relações entre água, agricultura e geração energética no nordeste da China. O autor explicita a relação entre disponibilidade hídrica e produção de carvão

mineral, mostrando que a produção de carvão é maior nas regiões que apresentam a maior disponibilidade hídrica, enquanto a produção agrícola nessas regiões é menor, devido a competição entre áreas de cultivo e áreas de mineração de carvão, caracterizando assim um conflito entre produção energética e alimentícia na região. Em seu estudo Gao et al. (2018), mostra ainda que existe uma relação tênue entre disponibilidade energética e alimentar, sendo esta relação agravada devido a ocorrência de secas extremas e má alocação da produção, que pode ser observado segundo o autor, em que a produção de carvão sofreu uma diminuição de 15%, cerca de 136 milhões de toneladas, juntamente com uma redução de 42% da produção agrícola, aproximadamente 7,3 milhões de toneladas. Além das relações de entrada e saída, existem as competições em escalas regionais. Particularmente a água atua como fator limitante ditando a velocidade e quantidade com que ocorrem os outros processos (geração energética e produção alimentícia), principalmente nas regiões áridas e semiáridas e nas que apresentam uma enorme demanda hídrica (FALKENMARK; MOLDEN, 2008).

A bacia hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivarí e Jundiá (PCJ), apresenta como principal atividade econômica a produção industrial e agropecuária, e possui uma população de cerca de 5,8 milhões de habitantes (CBH-PCJ, 2018), das quais 5,5 milhões vivem em áreas urbanizadas e 282,8 mil vivem em áreas rurais. Apresenta, ainda, cinco grandes reservatórios, sendo três pertencentes ao sistema Cantareira, Jaguari, Jacaré, Atibainha, Cachoeira, utilizados para abastecer a região metropolitana de São Paulo, com uma vazão outorgada de 33m³/s, sendo que desta vazão, cerca de 9m³/s são fornecidos pela bacia hidrográfica do rio Atibaia, por meio dos reservatórios Atibainha e Cachoeira (CBH-PCJ, 2018). O Consumo energético predominante nas bacias do PCJ é o industrial apresentando 63,72% do total, seguido pelo residencial com 21,83% do total. Na bacia hidrográfica do rio Atibaia o consumo energético industrial é liderado pela região de Americana com 1,6 TWh/ano, Campinas se destaca no consumo energético residencial com 1,1 TWh/ano enquanto a região de Atibaia apresenta o maior consumo rural com 0,27 TWh/ano consumidos (ANEEL, 2017).

No caso da captação de água para o abastecimento humano, a demanda energética varia conforme a distância e desnível manométrico das fontes utilizadas, sendo que grandes centros geralmente necessitam trazer água de longas distâncias, - caso da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) - aumentando a demanda

energética para a captação. Atualmente, o setor de saneamento básico consome 2,3% de toda a geração elétrica nacional, enquanto setores como o agrícola (irrigação) apresenta um consumo dez vezes maior (SNSA; MCIDADES, 2017). Por outro lado, a carga energética rural para transporte de água não está totalmente concentrada no setor elétrico devido à utilização de microgeração.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Mapear possíveis cenários de conflitos, atuais e futuros para os problemas relacionados ao uso e demanda de água, na bacia hidrográfica do rio Atibaia

2.2. Objetivos específicos

- Realizar o balanço energético e alimentar da bacia hidrográfica do rio Atibaia;
- Analisar as relações de interdependência entre água, produção de alimentos, e energia na bacia hidrográfica do rio Atibaia;
- Equacionar as relações de interdependência na bacia hidrográfica do rio Atibaia;
- Discutir soluções para desequilíbrio entre as variáveis analisadas: capacidade hídrica, produção de alimento, e energia;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Relações de interdependência entre usos de água energia e alimento

3.1.1. Definição

Água, energia e alimento estão interligados. Não se chegou ainda a um consenso sobre a definição de interdependência podendo-se segundo Zhang et al. (2016) dividi-la em duas categorias, uma qualitativa e a outra quantitativa. Na primeira, a relação de interdependência é definida como as interações entre diferentes subsistemas ou setores contidos no sistema pertencente às relações, como por exemplo: A interdependência entre água e energia, que pode ser apresentada como as relações entre energia e água, em que água é necessária durante a produção energética e de alimentos, energia é necessária para a distribuição de água, e por fim biomassa (alimento), pode ser utilizada para a geração energética (LIU et al., 2016). Na segunda categoria, a interdependência é apresentada como uma análise da quantidade de interações entre os nós (água, energia e alimento), de tal forma que deve ser analisada de forma sistemática, considerando as interações humanas e naturais a fim de se criar uma gestão integrada dos recursos naturais e criar sinergias entre os sistemas de exploração e distribuição de água, produção alimentícia e energética

Cai et al. (2018) incluiu ainda na segunda categoria os processos químicos, físicos e as relações de entrada e saída de recursos ao nexo, assim como as interações dominadas por instituições, mercados e infraestrutura. Esta categoria foca na representação das interações entre os diferentes setores com o objetivo de englobar todas as características que compõe as relações de interdependência. Quanto às questões sobre segurança hídrica e de abastecimento, enfatiza-se que a falha em um dos três sistemas pode exacerbar as pressões nos outros dois setores, como ocorrido em Calcutá em 2012, que devido a uma seca severa os produtores agrícolas tiveram que aumentar a quantidade de água subterrânea utilizada para a irrigação, acarretando um elevado acréscimo no consumo energético da região

pressionando assim o sistema elétrico, que já estava sofrendo com o rebaixamento do nível dos rios e reservatórios, levando assim cerca de 690 milhões de pessoas à ficarem sem energia elétrica (WEBBER, 2015).

3.1.2. Classificação das interdependências

Zhang et al. (2016) classifica os fatores que afetam diretamente as inter-relações entre alimento energia e água, dividindo-o em duas classes principais, fatores físicos, e sociais, como pode ser observado na Figura 1 a seguir. Os fatores físicos, como variações climáticas, climas extremos e desastres naturais podem modificar a provisão de água energia e alimento, pois influenciam diretamente em suas cadeias produtivas e processos produtivos. Pode-se exemplificar o caso de climas extremos como secas e inundações, que atuam diretamente na produção agrícola e energética. Yang et al. (2016) mostrou por meio da aplicação de um modelo hidrológico na Paquistão, que tanto um clima mais quente, quanto um clima mais úmido podem aumentar o consumo energético. Segundo o autor, uma diminuição de 20% da precipitação, combinado com um acréscimo de 4.5°C na temperatura média, ocasionaram um acréscimo de 35% no consumo energético para o bombeamento de águas subterrâneas para a irrigação. Já os fatores sociais como padrões de consumo, uso de novas tecnologias e comportamento do usuário podem modificar a gestão de tais recursos, favorecendo a oferta no lugar da demanda. Mudanças no padrão de dieta da população podem modificar o uso energético e a pegada hídrica, como observado por Tom, Fischbeck e Hendrickson (2016) nos Estados Unidos, em que uma mudança para a dieta recomendada pelo Departamento de Agricultura pode aumentar o uso energético em 43% e o consumo de água azul em 16%.

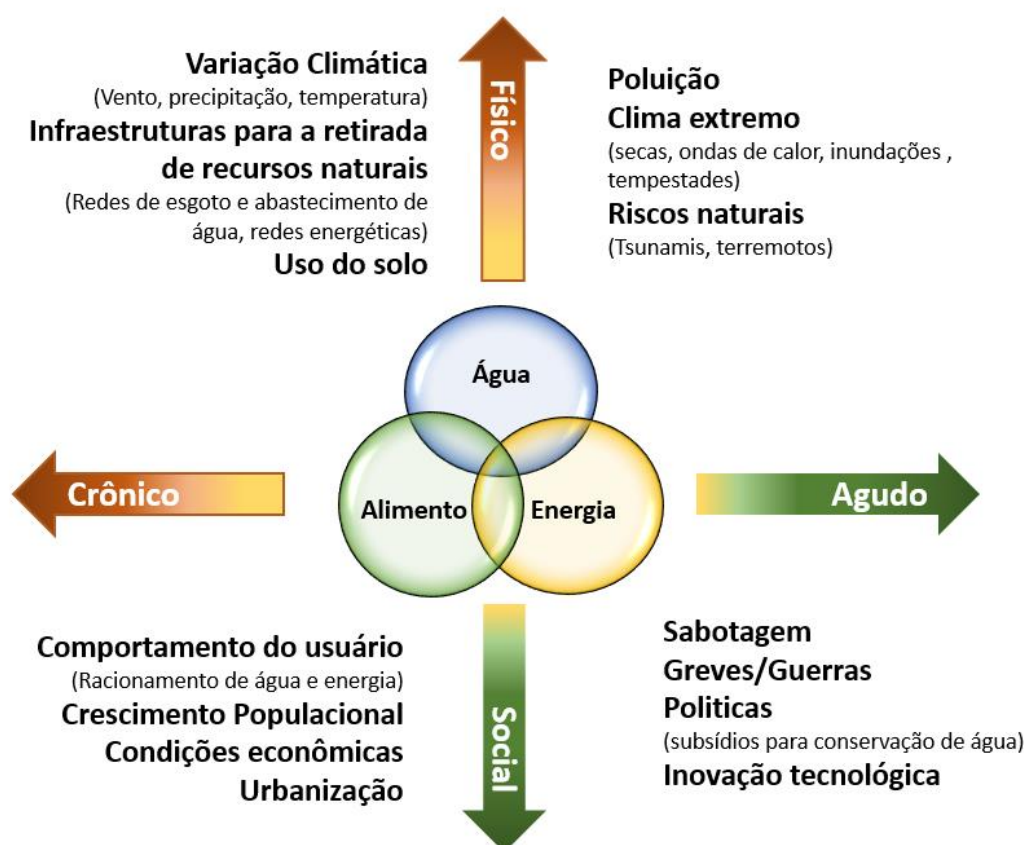


Figura 1: Relações de interdependência entre água energia e alimento
 Fonte: Zhang modificada pelo autor

Keskinen et al. (2016) considera três classificações complementares para a classificação das interdependências entre água, energia e alimento: quantitativa, política e disciplina de uso. A primeira analisa a interdependência entre os setores de forma quantitativa, provendo informações integradas possibilitando um melhor planejamento e tomadas de decisão entre os três setores, focando nas dependências críticas, diminuindo-se assim as permutas entre água energia e alimento. O segundo considera que os setores estão relacionados entre si, devendo haver colaboração e coerência política promovendo sustentabilidade e eficiência entre os usos de água energia e alimento, identificando os fatores chave para as relações de interdependência. E o terceiro, enfatiza as trocas e permutas entre os setores, encorajando a sinergia Inter setorial entre os usos.

3.1.3. Água e Energia

As relações de interdependência entre água e energia são de grande interesse para as políticas e planejamentos de distribuição e uso de recursos. Água é necessária para a extração de combustíveis fósseis, refino do petróleo e geração de energia elétrica, enquanto energia é necessária para o tratamento da água, abastecimento humano e tratamento de esgoto (SIDDIQI; KAJENTHIRA; ANADÓN, 2013)

Wang e Chen (2016) analisaram as relações de interdependência entre água e energia em Hong Kong, para que se pudesse realizar uma estimativa da demanda para o ano de 2050 aplicando um modelo hidrológico. Os autores observaram que cerca de 80% de toda a água potável de Hong Kong é importada da província vizinha Guangdong e que para auxiliar a rede de abastecimento, a cidade utiliza água salgada em seu sistema de descarga residencial, cerca de 71% de toda a demanda. Por meio da modelagem, os autores concluíram que o consumo energético para tal abastecimento chega a 429TJ quando se é utilizada água potável e 378TJ para água salgada, o que corresponde a utilizar 0,6% de toda a energia produzida em Hong Kong para o abastecimento destes sistemas. Para o ano de 2050 os autores preveem um acréscimo de 11% no consumo energético para o abastecimento humano.

Gu, Teng e Wang (2014) estudou as relações de interdependência entre água e energia realizando o balanço hídrico e energético das indústrias chinesas, com base nas medidas de redução do consumo energético tomadas pelo quinquenal chinês para o período de 2010 a 2015. Durante este período, o governo chinês poupou o equivalente a 608 milhões de toneladas equivalentes de carvão (Tec), 19% de todo o consumo energético do país no período. Segundo os autores, poupar energia gera uma redução no consumo hídrico, que pode ser observado por meio do balanço hídrico e energético. Gu, Teng e Wang (2014) estimou que para o ano de 2015 a China utilizaria cerca de 3,9 bilhões de toneladas de carvão, correspondendo a 155 bilhões de metros cúbicos de água, cerca de 24% de todo o consumo hídrico chinês para o ano de 2015. Combinando a performance energética de cada setor industrial, com a quantidade de água utilizada, os autores mostraram que durante o período de 2010 a 2015, foram economizados cerca 9,2% do consumo energético industrial e

13,4 bilhões de m³ de água. Desta forma Gu, Teng e Wang (2014) afirma que existe uma relação direta entre produção energética e consumo de água.

Siddiqi, Kajenthira e Anadón (2013) mostram que os recursos hídricos na Jordânia se apresentam de forma escassa, sendo o consumo anual per capita de 145m³, valor bem abaixo da fronteira da escassez hídrica, 1000m³ per capita. Segundo os autores, 68% do abastecimento humano da região é realizado por meio de bombeamento ou tratamento de efluentes, sendo a distribuição dos recursos hídricos do país voltado em sua grande maioria, 56% para a irrigação, enquanto 39% participam do abastecimento municipal e apenas 5% é utilizado para a indústria. Já no setor energético, a Jordânia apresenta-se quase totalmente dependente da importação de óleo e gás, no ano de 2011 o país produziu apenas 3% de toda a energia consumida. Os autores mostram, por meio da aplicação de um modelo quantitativo que a água não é muito utilizada para a produção energética do país, apenas 5% de todo o consumo industrial, entretanto, o uso energético para o abastecimento é grande, representando 14% do consumo energético total. Desta forma, Siddiqi, Kajenthira e Anadón (2013) classificam as relações de interdependência como assimétricas com baixa dependência de água para geração energética e alta dependência energética para o abastecimento humano.

3.1.4. Energia e Alimento

O consumo de energia utilizado para a produção de alimentos pode ser caracterizado em dois tipos, o consumo direto e indireto. Consumo direto é aquele em que a energia é utilizada diretamente para a produção agrícola, seja por utilização em bombas para a irrigação, ou combustível para as máquinas. Já o consumo indireto relaciona toda a energia utilizada para as práticas agrícolas, como a produção dos insumos utilizados na agricultura, fertilizantes e herbicidas, por exemplo (KESKINEN et al., 2016). O consumo energético relacionado à produção de alimentos apresenta uma participação significativa, visto que cerca de 30% de todo o consumo mundial de energia, de fontes renováveis ou não, é destinado ao setor agropecuário, dos quais 6%, à produção primária de lavouras, criações e piscicultura (SCANLON et al., 2017).

O estudo realizado por Rafiee, Avval e Mohammadi (2010) mostra o balanço energético para a produção de maçã em Teerã, onde foram observados dados de 56 produtores da região. O total de energia utilizado para a produção foi de cerca de 42819.25 MJ/Ha, sendo o diesel responsável por aproximadamente 22% do fornecimento energético, seguido pela queima de gases provenientes da compostagem 18% e energia elétrica com 13%. Segundo o estudo, o consumo energético direto foi mais significativo, 51%, o que é justificado pela necessidade de bombeamento de água para a irrigação do campo, e utilização de maquinário para preparação do solo.

Daher e Mohtar (2015) simularam cenários para a segurança alimentar no Catar, imaginando que o país aumentaria sua produção de alimentos em 15%, mas modificando a fonte energética utilizada para a extração e distribuição de água, sendo utilizada no primeiro momento água subterrânea e em segundo água proveniente de dessalinização. Foram estudadas 41 plantações, em que foram utilizados como fonte energética 50% proveniente da queima do diesel, e 50% queima de gás natural, e posteriormente 100% da demanda energética abastecida por diesel. Com a simulação os autores observaram que para se obter este acréscimo na produção, seria necessário um aumento de 82% na quantidade de energia necessária para a retirada de água, e 97% para a produção de alimentos local. Analisando os dois cenários, modificando-se apenas a fonte hídrica, observou-se um acréscimo de 12,5% no consumo energético.

O processo produtivo no setor agrícola atual é cada vez mais mecanizado, sendo funções como semeadura, irrigação e colheita realizados com a utilização de implementos agrícolas, dependentes de combustível e eletricidade (SCANLON et al., 2017). Em termos de consumo energético na lavoura, pode-se citar como principais consumidores os motores e bombas, sendo a irrigação a principal fonte consumidora, seguida pelos outros implementos, e por fim, pelo transporte dos insumos e produtos.

O rápido crescimento econômico da China torna necessário a utilização de diversas formas de produção energética, dentre elas a bioenergia. Yang, Zhou e Liu (2009) investigaram a produção de bioetanol para suprir a demanda energética entre os anos de 2010 e 2020, onde foi observado que a produção atual chinesa utiliza cerca de 4% de toda sua produção de milho, sendo no ano de 2006 produzidas 1,73 milhões de toneladas de bioetanol. O estudo projeta que para atender a demanda para o ano de 2020, seja necessário a utilização de aproximadamente 10% de toda a área

cultivada da China, gerando uma produção de 12 milhões de toneladas por ano de bioetanol, sendo estimado o consumo de cerca de 30 milhões de toneladas de milho e 150 milhões de toneladas de cana de açúcar para sua produção. Para isto, serão necessários 72km³ de água por ano, o equivalente a descarga anual do rio Amarelo. Para Yang, Zhou e Liu (2009) o crescente desenvolvimento na produção e consumo de biocombustíveis chinesa apresenta-se como um grande causador de impactos na segurança alimentar, hídrica e ambiental do país.

3.1.5. Alimento e Água

O uso da água na produção de alimentos desempenha um papel enorme no consumo mundial, cerca de 70% do volume total retirado de água no mundo, dos quais 90% diretamente ligados à irrigação (SCANLON et al., 2017). Mudanças na dieta levam ao acréscimo do consumo de produtos oriundos de fontes animais. Isto ocorre de forma clara em países como Índia e China, sendo que na China o consumo de água para a produção de alimento em 1961 era de 255m³/pessoa/ano, e em 2003 passou a ser de 860m³/pessoa/ano, representando um acréscimo de 340% (LIU et al., 2016)

Sem o manejo apropriado, o elevado desperdício de alimentos vem acelerando a demanda por comida. A China, por exemplo, apresenta uma perda de cereais durante a estocagem, processamento e distribuição de cerca de 35 milhões de toneladas, correspondendo a 14% de toda a produção anual, sendo, ainda, 5,5 milhões de toneladas desperdiçadas pelo consumo doméstico (LIU; SAVENIJE, 2008). Ainda segundo Liu e Savenije (2008), tal evento aumenta a quantidade de área necessária para o plantio, alterando, assim, as características de uso e ocupação do solo de regiões produtoras, fazendo com que os recursos hídricos presentes em reservas subterrâneas sejam explorados de forma mais intensa e desordenada.

Gheewala et al., (2014) estudou a demanda hídrica para a produção de alimentos (mandioca) e biomassa (cana-de-açúcar) em 25 bacias hidrográficas da Tailândia. Gheewala et al., (2014) afirma que o acréscimo acelerado na produção alimentar e produção energética por meio da utilização de biocombustíveis aumentará as pressões sobre o uso da água na Tailândia, pois apresenta uma base agrícola

muito grande. Em seu estudo, os autores quantificam o volume necessário de água para a produção de mandioca, arroz e milho, sendo a mandioca o maior consumidor de água durante a safra, cerca de 7827m³ por hectare, seguido pelo arroz com 5345m³ e milho com 3756m³. Gheewala et al., (2014) observa que para uma melhor utilização da água, os métodos de cultivo devem ser melhorados, o que fica evidente quando observamos a produção atual versus a produção estimada para cada cultura, sendo atualmente produzidos cerca de 19ton/ha de mandioca, sendo a média de 50ton/ha, e 76ton/ha de cana de açúcar sendo a média de 112ton/ha, o que demonstra uma baixa eficiência produtiva e elevado consumo hídrico.

Uma das maneiras de se medir a relação entre alimento e água é por meio da produtividade hídrica, que segundo Sharma et al., (2010), indica a seguridade alimentar da bacia hidrográfica, sendo uma relação entre a produção agrícola (alimentar) e a quantidade de água utilizada para esta produção. Este indicador, está diretamente relacionado à conservação dos recursos hídricos, sendo possível aumentar a eficiência produtiva da bacia hidrográfica, sem colocar a alocação dos recursos hídricos em risco. Sharma et al., (2010) afirma que um acréscimo da produtividade hídrica significa uma diminuição na necessidade de água e terra para a produção. A utilização de tecnologias aplicadas à conservação dos recursos hídricos como o plantio direto (sem arado), canteiros elevados e no caso apresentado por Sharma et al., (2010), semeadura direta do arroz, reduzem o consumo hídrico. Foi observado uma redução de 24% no consumo hídrico da região, e ainda uma redução de 52% no consumo de combustíveis, o que segundo o autor se dá devido à redução no número de irrigações anuais.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. A Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

A bacia hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí atende municípios nos estados de São Paulo e Minas Gerais, cerca de 58 municípios em São Paulo e 4 em Minas Gerais. Apresenta cerca de 5.473.84 milhões de habitantes, sendo que 96,6% da população pertencem à zona urbana, e somente 3,4% às zonas rurais. Apresenta mananciais de extrema importância que são altamente demandados para

suprir as necessidades hídricas da região (CBH-PCJ, 2018). Possui 7% do PIB nacional, segundo estimativas do consorcio CBH-PCJ (2018), é esperado um crescente grau de urbanização na região, principalmente na região da bacia do rio Jundiáí, chegando a cerca de 98,8% em 2020.

O aumento da urbanização e industrialização da região das bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí pode ser, entre outros fatores, atribuído ao processo de desconcentração industrial que ocorreu na região metropolitana de São Paulo nos anos 70, levando grande parte dos polos industriais para o interior do Estado. O governo federal estimulou a interiorização implantando projetos como refino de petróleo e petroquímica na região de Paulínia, e o Proálcool, que gerou impactos na região metropolitana de Campinas, aumentando a sua produção sucroalcooleira.

Com o acréscimo das manchas urbanas, e consequente acréscimo populacional, a região passou a ter uma maior demanda por recursos hídricos. Deve-se citar, ainda, o fato de que com a mudança no tipo de produção econômica da bacia hidrográfica ocorreu uma mudança no tipo do uso e ocupação do solo, e na utilização dos recursos hídricos, gerando atualmente uma competição entre os usos da água.

A grande bacia hidrográfica do PCJ é formada pelas sub-bacias dos rios Camanducaia, Jaguari, Atibaia, Piracicaba, Capivari e Jundiáí, que são rios importantíssimos para a região metropolitana de Campinas (RMC), e para a região metropolitana de São Paulo (RMSP). O potencial de geração e abastecimento dos recursos hídricos da região não é utilizado em totalidade para abastecê-la, e uma parcela substancial de tais recursos é transposta pelo sistema Cantareira (parte da bacia hidrográfica do Rio Atibaia e do Rio Jaguari), para a bacia hidrográfica do Alto Tietê, que abastece a RMSP (CBH-PCJ, 2018).

Além de abastecer o sistema Cantareira, existem transferências internas de água na bacia hidrográfica devido aos conflitos e demandas hídricas que ocorrem na própria região. Exemplos das transferências internas são: Adução de água proveniente do Rio Atibaia para o Rio Jundiáí Mirim, e captação de água da sub-bacia do Rio Atibaia para as bacias do Capivari e Piracicaba. A primeira tem a finalidade de abastecer a cidade de Jundiáí através da Represa de Acumulação, o que é realizado por meio de duas adutoras de 11 km de comprimento localizadas na cidade de Itatiba, com capacidade para 1200 litros de água por segundo (DAEE, 2003). A segunda é realizada através do sistema de abastecimento de água de Campinas, cuja captação

ocorre no Distrito de Souza, Campinas, com a finalidade de abastecer 95% da RMC (SANASA, 2016).

Segundo CBH-PCJ (2018), as principais atividades econômicas da bacia hidrográfica se concentram nas produções agropecuária e industrial. Destacam-se o polo petroquímico de Paulínia, onde se localiza a Replan (refinaria de Paulínia), que segundo a Petrobrás é a maior refinaria do país, apresentando uma capacidade de processamento de 69 mil m³/dia de petróleo (434 mil barris,) o que corresponde a 20% de toda a produção nacional; o parque têxtil de Campinas e Hortolândia, que, no ano de 2017 obteve, segundo dados do sindicato têxtil, uma produção de 279,4 mil toneladas entre linhas e malhas, e cerca de 75 milhões de peças confeccionadas; as indústrias sucroalcooleiras de Jundiaí - que constitui uma das mais tradicionais regiões produtoras de cana de açúcar do estado de São Paulo apresentando 9 usinas em funcionamento - com 9% da produção total do estado. Todos os casos acima listados apresentam atividades extremamente consumidoras de água e energia elétrica.

4.1.1. A bacia hidrográfica do rio Atibaia

A bacia hidrográfica do Rio Atibaia situa-se entre os meridianos 46º e 47º oeste e latitudes 22º e 24º sul, e está localizada em uma região de destaque, pois, além de abranger parte da região metropolitana de Campinas, atende parte da região metropolitana de São Paulo. Apresenta, ainda, um diversificado parque industrial e um importantíssimo polo tecnológico. Formado pela junção dos Rios Atibainha e Cachoeira, entre os municípios de Bom Jesus dos Perdões e Atibaia, o Rio Atibaia abastece cerca de 75% da população da cidade de Atibaia, e 95% da cidade de Campinas. O rio Atibaia é um dos contribuintes do Rio Piracicaba, que recebe suas águas na região de Paulínia. A bacia hidrográfica do Rio Atibia, abastece cerca 23 municípios, 7 dos 19 municípios que compõe a RMC, quais sejam : Americana, Campinas, Itatiba, Paulínia, Sumaré, Valinhos e Vinhedo, Figura 2, tanto para captação de água quanto lançamento de efluentes.(DEMANBORO; LAURENTIS; BETTINE, 2013)

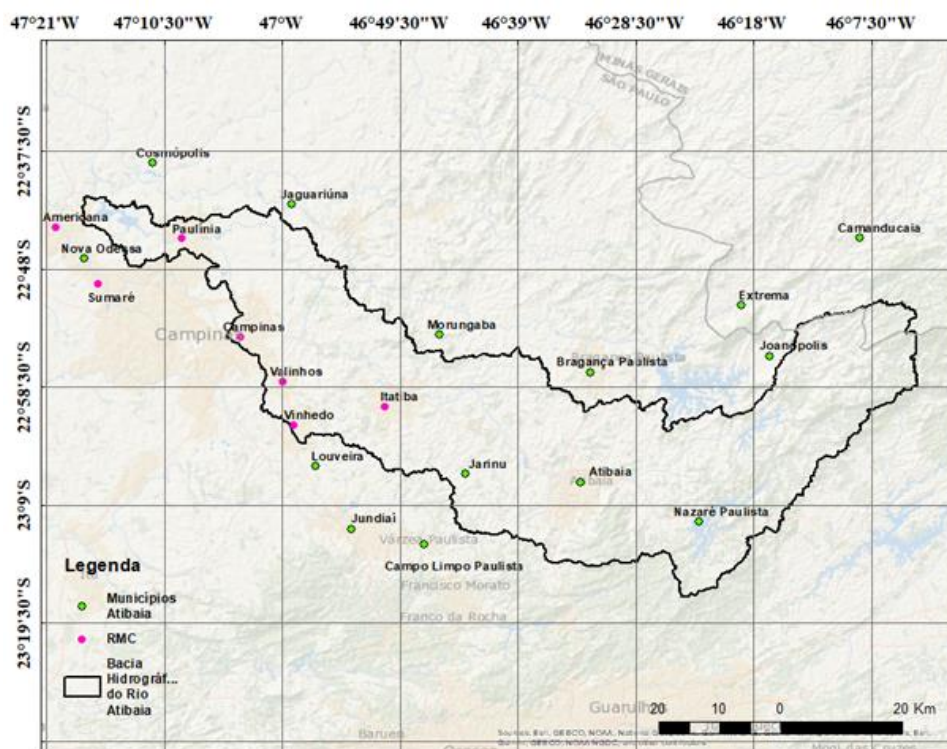
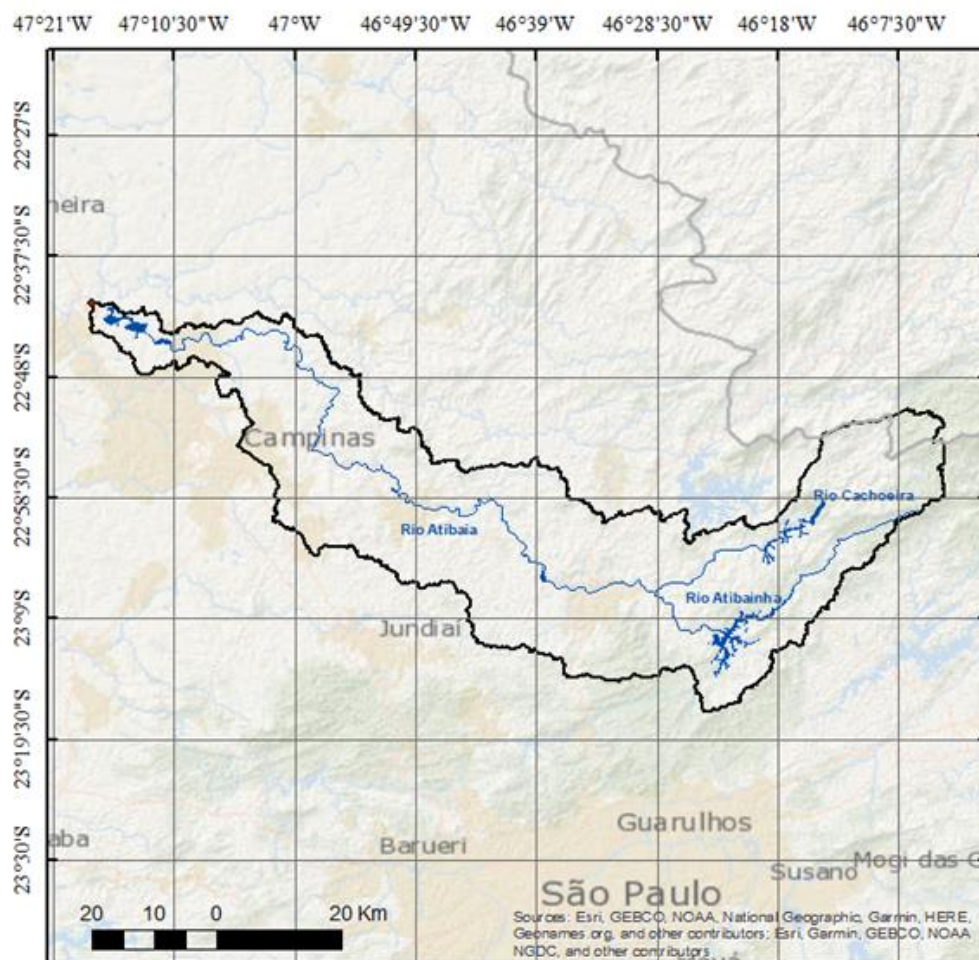


Figura 2: Municípios abastecidos pela bacia hidrográfica do rio Atibaia
Fonte: IBGE- Elaborado pelo Autor

A Bacia Hidrográfica do rio Atibaia, apresenta uma área total de 2.868,74 km², dos quais 2.828,76 km² estão no estado de São Paulo, e somente 39,98 km² fazem no estado de Minas Gerais. Segundo o relatório da situação dos recursos hídricos de 2017, a região corresponde a cerca de 22,8% da área total da Bacia hidrográfica do PCJ, e apresenta, ainda, uma área de 715 km² pertencentes ao sistema Cantareira, cerca de 5,7% da área total do sistema (IRRIGART, 2010).

Formada pelos Rios Cachoeira e Atibainha, Figura 3, possui consumo de água em sua maioria urbano, correspondendo a cerca de 5,02m³/s, seguido do uso industrial 3,5m³/s, e, por fim, o rural, com cerca de 1,7m³/s (IRRIGART, 2010). Deve se atentar para o fato de que a Bacia hidrográfica do Rio Atibaia fornece, ainda, 9m³/s de água para o sistema Cantareira, sendo 4m³/s provenientes do reservatório Atibainha, e 5m³/s provenientes do reservatório de Cachoeira(WHATELY; CUNHA, 2007).



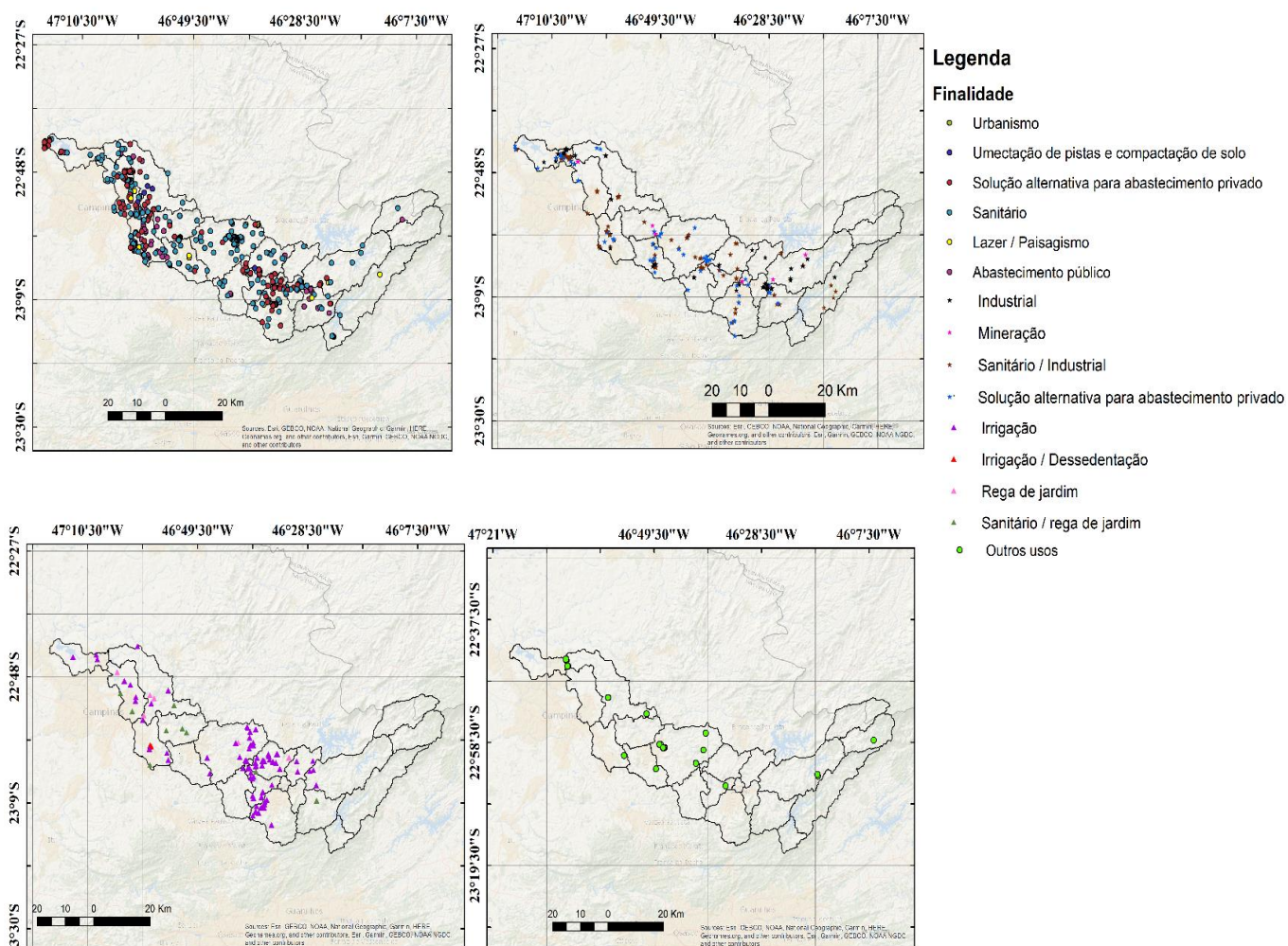


Figura 4: Pontos de captação de água na bacia hidrográfica do rio Atibaia
Fonte: DAEE, elaborado pelo Autor

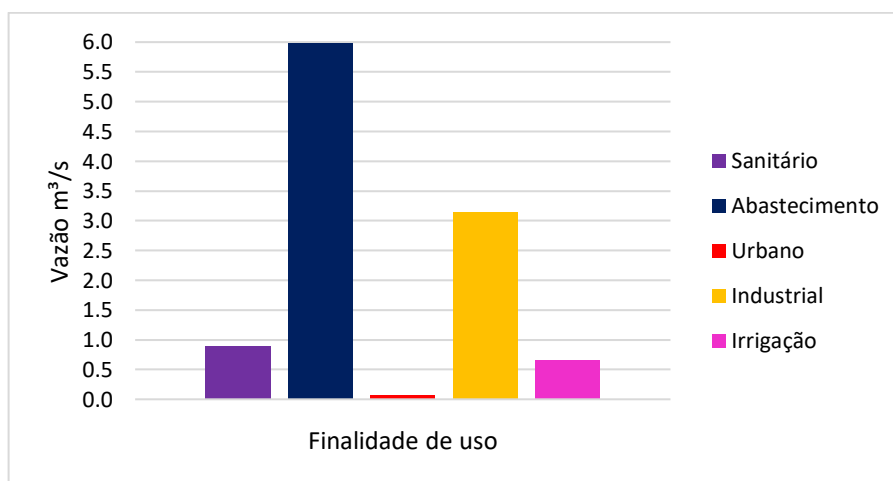


Figura 5 Captações outorgadas para a bacia hidrográfica do Rio Atibaia
Fonte: ANA, elaborado pelo autor.

Da Figura 5 pode-se verificar grandes diferenças entre as captações para os diferentes usos da água sendo o abastecimento urbano e o uso pela indústria os maiores consumidores dos recursos hídricos da região, correspondendo à cerca de 55,1% e 29,3% de toda a retirada de água, seguidos pelo uso sanitário e irrigação com 8,3% e 6,4% respectivamente. Observa-se pela Figura 4, que existe uma concentração de pontos de retirada de águas em algumas regiões estratégicas ao longo da bacia hidrográfica. São locais de destaque, a região metropolitana de Campinas, englobando municípios como Paulínia, Americana, Valinhos e Vinhedo, onde é possível verificar uma alta concentração de pontos de uso de água para abastecimento urbano, pois são as regiões com maior densidade demográfica da bacia hidrográfica. Outro local de destaque se encontra na região entre os municípios de Itatiba e Atibaia, pois apresenta a maior concentração de pontos de outorga para irrigação, devido à grande atividade agropecuária da região. Quanto ao uso industrial, observa-se um aglomerado de pontos de outorga na região do município de Paulínia, devido ao seu desenvolvido polo industrial e petrolífero, apresentando pontos com outorgas de até 2,5m³/s.

4.1.1.1. Características físicas da Bacia Hidrográfica do Rio Atibaia

Os parâmetros físicos de uma bacia hidrográfica são de extrema importância para a análise do comportamento hidrológico e realização do balanço hídrico, ainda mais quando se utilizam ferramentas como modelos hidrológicos, em que uma grande parte dos dados de entrada são relacionados à caracterização física da região de estudo. A bacia hidrográfica do Rio Atibaia apresenta, segundo Rossi (2017), aproximadamente 11 tipos de solos predominantes, Figura 6. Os tipos de solo predominantes na bacia hidrográfica, são, em ordem: cambissolos háplicos, e os argilosos vermelho-amarelos, apresenta ainda latossolos vermelho-amarelos e gleissolos.

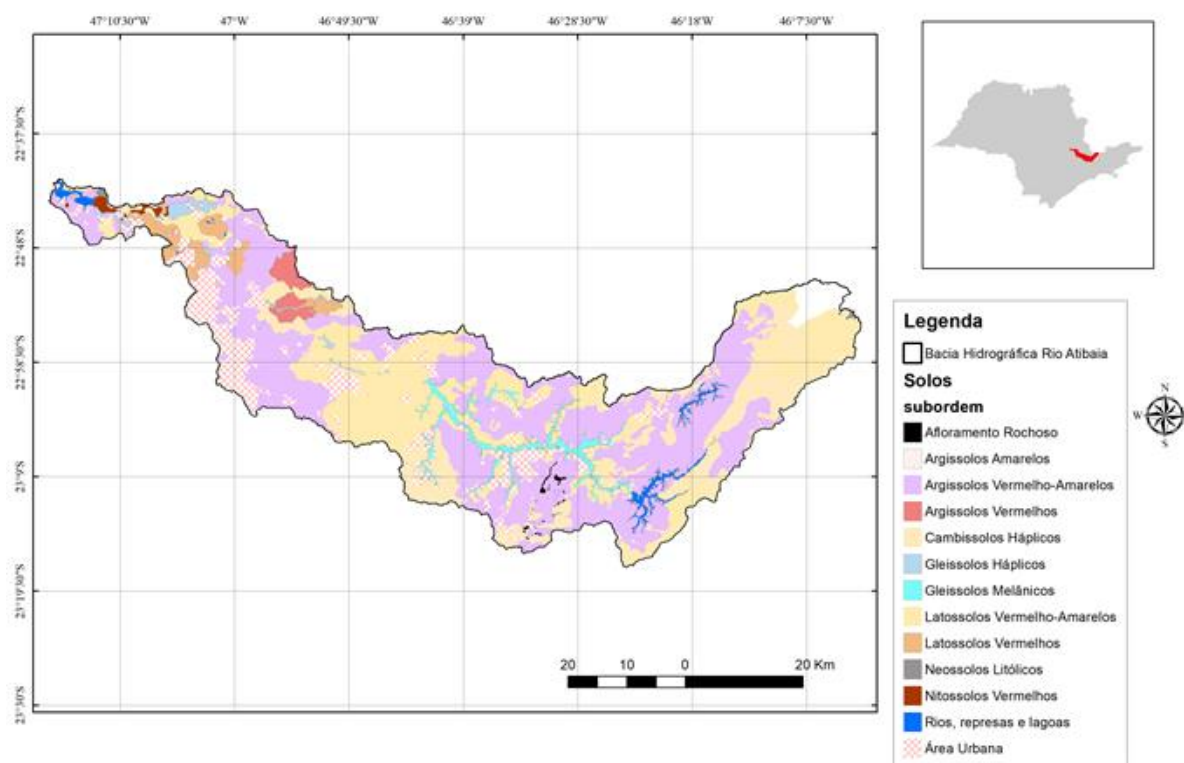


Figura 6: Mapa pedológico da bacia hidrográfica do rio Atibaia
Fonte: Rossi 2017. Modificado pelo autor.

A bacia hidrográfica do Rio Atibaia tem sua nascente em 2 rios, o Cachoeira e o Atibainha, sendo que o primeiro nasce no estado de Minas Gerais, e o segundo na cidade de Nazaré Paulista- SP. O relevo da região em estudo apresenta altitudes que variam entre 500 e 2100m em relação ao nível do mar.

4.1.1.2. O uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Atibaia

A região compreendida pela bacia hidrográfica do Rio Atibaia, assim como a região pertencente às bacias dos Rios Capivarí, Jundiaí e Piracicaba, apresenta um enorme potencial agrícola, uma vez que não possui, em sua maioria, fatores que limitem o uso agrícola do solo. Como visto a cima no mapa pedológico, Figura 6, a região apresenta em sua grande maioria solos medianamente profundos, moderadamente drenados e textura variando de média para argilosa. Nas áreas em que prevalecem os solos com maior fertilidade e com relevo leve - o que facilita a

mecanização - predomina o cultivo da cana de açúcar, principalmente nos arredores da cidade de Piracicaba e na Região Metropolitana de Campinas (RMC), Figura 7, Latossolo vermelho-amarelo e o latossolo vermelho escuro predominam na região, o que propicia uma boa qualidade do solo para o plantio. Além da cultura de cana de açúcar, a região apresenta uma forte produção de frutas, principalmente nas cidades de Vinhedo e Valinhos. A ocupação do solo se divide entre as áreas densamente urbanizadas como a RMC, mas, em sua grande maioria, a bacia hidrográfica do Rio Atibaia se divide entre zonas de campo aberto e zonas de mata nativa, apresentadas na tabela 1.

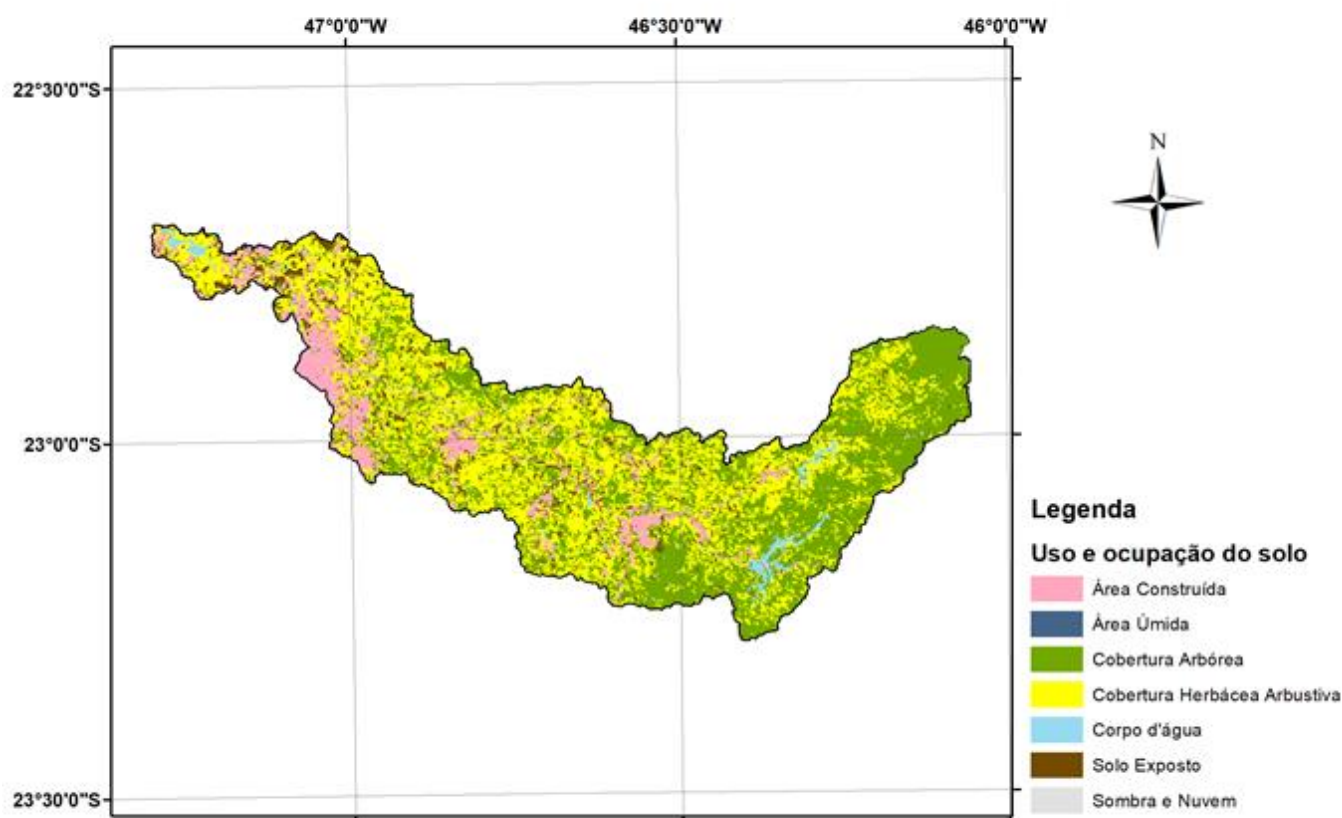


Figura 7: Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Atibaia
 Fonte: Governo do Estado de São Paulo – Coordenadoria de planejamento ambiental
 Modificado pelo Autor.

Tabela 1: Principais tipos de uso e ocupação do solo na Bacia hidrográfica do rio Atibaia
Fonte: Autor

Posição	Classificação	%
1	Corpo hídrico	0,60
2	Área urbana	8,61
3	Mata nativa	15,66
4	Uso agrícola	64,33
5	Área de pastagem	10,80

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Representação Metodológica

A metodologia deste trabalho está composta de três análises: 1) balanço hidroalimentar, 2) balanço energético, e 3) identificação das interdependências por meio de análise de envoltória de dados. As Figuras 8,9 e 10 a seguir apresentam um breve esquema da metodologia a ser empregada neste trabalho.

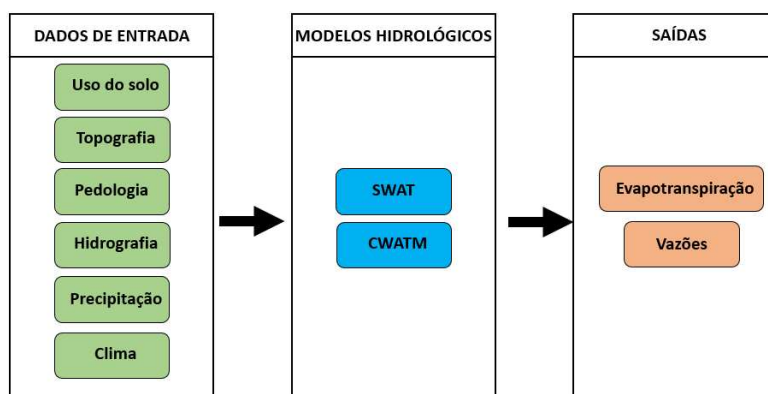


Figura 8: Representação modelagem hidrológica
Fonte: Próprio Autor

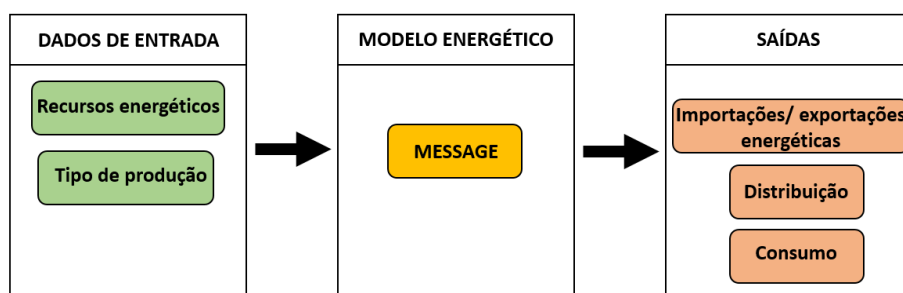


Figura 9: Representação modelagem energética
Fonte: Próprio Autor

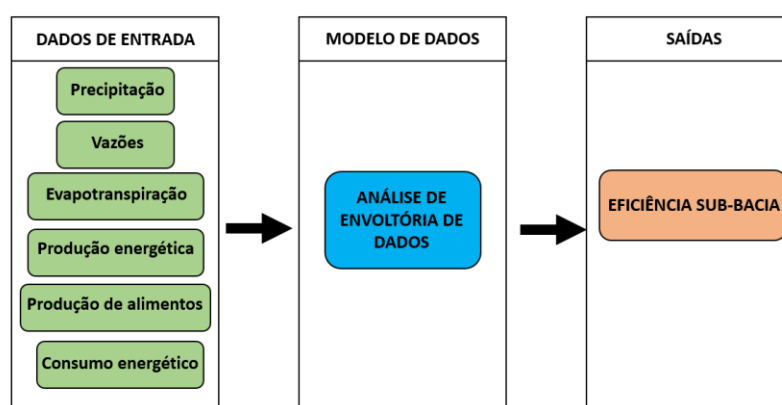


Figura10: Representação procedimento utilizado para a identificação das relações de interdependência
Fonte: Próprio Autor

A metodologia proposta para este trabalho, será realizada em três análises. A primeira análise consiste em realizar o balanço hídrico e alimentar da bacia hidrográfica do rio Atibaia, para o período entre os anos de 2000 e 2017, por meio de dois modelos hidrológicos distintos, o modelo SWAT e o modelo CWATM, a fim de se obter as disponibilidades hídricas da região juntamente com o balanço alimentar, realizado por meio da análise das taxas de evapotranspiração e produtividade hídrica, razão entre a produção de alimentos e a taxa de evapotranspiração local. Será realizada ainda na primeira análise uma fase de calibração, validação e comparação entre os modelos utilizados, a fim de se verificar a adequação dos modelos para a bacia hidrográfica. Na segunda análise, será realizado o balanço energético da bacia hidrográfica do rio Atibaia, onde serão determinados e quantificados os usos e demandas energéticas da região, por meio da aplicação do modelo energético MESSAGE, que será utilizado neste trabalho pois, segundo Burek (2018) apresenta

uma ótima integração com o modelo CWATM, podendo também ser trabalhado juntamente com o modelo SWAT. Por fim, será realizado na terceira análise a identificação das interdependências entre água, energia e alimento na bacia hidrográfica do rio Atibaia, por meio de análise de envoltória de dados, em que será analisada a eficiência no uso de água e energia, e produção de alimentos em pequenas sub-bacias do rio Atibaia, para posterior mapeamento dos conflitos pelo uso da água na região.

5.2. Modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos buscam representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, que corresponde à transformação de precipitação sobre uma bacia hidrográfica em vazão através da seção de um rio (ALMEIDA; SERRA, 2017). De acordo com Sorooshian, Sharma e Wheeler (2008), modelos são utilizados para prever o comportamento de um sistema e entender diversos processos hidrológicos, por meio de um conjunto de equações utilizadas para estimar fenômenos como o escoamento superficial, com base nas características físicas e climáticas de uma bacia hidrográfica, como propriedades do solo, cobertura vegetal, topografia e disponibilidade de água no solo. São amplamente utilizados no setor elétrico, onde são necessárias por exemplo, previsões diárias de vazões, a fim de se atender a demanda energética.

Os modelos hidrológicos são classificados como estocásticos ou determinísticos, podendo ainda ser empíricos, físicos ou conceituais. Se a probabilidade de ocorrência de uma determinada variável for considerada, por exemplo o tempo, diz-se que o modelo é estocástico. Caso contrário o modelo se torna determinístico (TUCCI; PARRAGA; GOLDENFUM, 1999). Os modelos empíricos são aqueles elaborados a partir da análise exclusivamente de dados observados, enquanto os modelos físicos da análise dos fenômenos físicos, por meio de equações matemáticas. Já os modelos conceituais, descrevem componentes do ciclo hidrológico utilizando-se da analogia a reservatórios, sendo representados por um número de reservatórios que representam as características físicas da bacia

hidrográfica. Para este tipo de modelo, são utilizadas equações semi-empíricas, sendo necessários um grande volume de dados meteorológicos, e hidrológicos, visto que os modelos necessitam de validação e calibração (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Caso dos modelos SWAT (Soil and Water Assessment Tool) e do CWATM (Community Water Model), utilizados neste trabalho.

5.3. Balanço hídrico e alimentar

Para a simulação do escoamento superficial, e verificação dos impactos causados por alterações do uso do solo no balanço hídrico, serão utilizados neste trabalho o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), e o modelo CWATM (Community Water Model).

O modelo SWAT, representa os processos físicos que causam impacto e governam a hidrologia de uma determinada região, sendo aplicado de forma satisfatória em grandes e médias bacias hidrográficas (ABBASPOUR et al., 2007). Como demonstrado pelo estudo de Karabulut et al., (2016), que utilizou o modelo SWAT para analisar e mapear a escassez hídrica na bacia hidrográfica do rio Danúbio, com a finalidade de auxiliar nas tomadas de decisão referentes ao uso de água e às relações de interdependência entre água, energia e alimento. A bacia hidrográfica é representada em um determinado número de sub-bacias, sendo cada sub-bacia dividida em Unidades de Resposta Hidrológica, que são áreas dentro das sub-bacias que apresentam combinações únicas de solo, declividade e uso e ocupação do solo. O balanço hídrico local é realizado por meio da equação 1 a seguir. (ABBASPOUR et al., 2007).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - W_{see} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Onde:

SW_t = quantidade de água final presente no solo (mm)

SW_0 = quantidade inicial de água existente no solo no dia i (mm)

t = tempo (dias)

P_d = precipitação diária (mm)

Q_{sup} = escoamento superficial diário (mm)

E_a = evapotranspiração diária (mm)

W_{see} = percolação diária (mm)

Q_{gw} = escoamento lateral (mm)

Os componentes do balanço hídrico incluem escoamento superficial, infiltração – presente no cálculo do escoamento superficial, evaporação, escoamento lateral, que é o escoamento que ocorre de forma paralela à inclinação do terreno, e percolação diária, que é realizada nos aquíferos rasos e profundos. O volume de escoamento superficial é determinado por meio da fórmula do Soil Conservation Service (SCS) do método do número de curva (CN). A evapotranspiração potencial (ETP) é determinada por meio do método de Penman Monteith, de acordo com a quantidade de dados disponíveis para cada região. Já a evapotranspiração real é obtida após a ETP ser ponderada pela quantidade de água presente no solo. A percolação de água ocorre quando a quantidade de água no solo excede a capacidade de campo. A quantidade de água que se move entre as camadas do solo, é calculada pela equação 1. Para a modelagem dos componentes do balanço hídrico se faz necessário a utilização dos dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados para a aplicação do modelo SWAT
Fonte: Próprio autor

Categoria	Tipo de Dado	Fonte
Topografia	Modelo digital de elevação (MDT) com resolução espacial de 12,5m x 12,5m	Alaska Satellite Facility (https://vertex.daac.asf.alaska.edu/)
Uso e cobertura do solo	Mapa de uso e cobertura do solo, e mapa pedológico	Coordenadoria de Planejamento Ambiental do Estado de São Paulo, e Rossi, 2017
Clima	Precipitação, temperaturas, radiação e velocidade do vento	DAEE, ANA, INMET
Escoamento	Descarga dos rios	DAEE, ANA

O modelo CWATM será utilizado também para a modelagem da bacia hidrográfica do Rio Atibaia, com a finalidade de se compararem os seus resultados com os obtidos pelo modelo SWAT, quanto à sua representatividade em relação aos dados fluviométricos coletados em campo.

O CWATM é um modelo criado para a avaliação e quantificação das demandas e disponibilidades hídricas, e avaliar como as demandas futuras de água irão evoluir em resposta às mudanças socioeconômicas e climáticas futuras. Assim como no modelo SWAT, é utilizada, na aplicação do modelo CWATM a equação de Penman Monteith para a determinação da evapotranspiração potencial, utilizando-se também de dados físicos e meteorológicos referentes à região em estudo, sendo possível a determinação tanto da demanda quanto da disponibilidade hídrica. A demanda hídrica é determinada por meio da inclusão dos consumos industriais e domésticos, assim como o uso para irrigação, que é estimado pelo consumo de cada tipo de cultura. A vegetação é levada em conta no modelo, para o cálculo do albedo, transpiração e interceptação, enquanto o solo é utilizado para a determinação da infiltração e escoamento superficial principalmente. O modelo utiliza as equações apresentadas por Todini (1996) para os cálculos de percolação, infiltração e escoamento superficial, em que se considera que toda a água precipitada sobre o solo é infiltrada, a não ser que o solo apresente cobertura impermeável ou tenha atingido total saturação. A bacia hidrográfica é dividida em porções infinitesimais que apresentam características únicas de solo e elevação, diferente do modelo SWAT. O balanço hídrico é realizado por meio da equação 2. Lagos e reservatórios são simulados em três estágios (conservador, normal e enchente), enquanto o amortecimento é calculado por meio da onda cinemática.

$$W_{t+\Delta T} = W_t + P - ET_a - R - D - I \quad (2)$$

Em que:

$W_{t+\Delta T}$ = umidade do solo no período de tempo $t + \Delta t$ (mm)

W_t = umidade do solo no dia t (mm)

P = precipitação entre os dias t e $t + \Delta t$ (mm)

ET_a = evapotranspiração entre os dias t e $t + \Delta t$ (mm)

R = escoamento superficial total entre os dias t e $t + \Delta t$ (mm)

D = perda através da drenagem entre os dias t e $t + \Delta t$ (mm)

I = percolação total entre os dias t e $t + \Delta t$ (mm)

O balanço alimentar foi quantificado por meio da variável produtividade hídrica, que é, segundo Sharma et al. (2010) a razão entre a produção de alimento na bacia hidrográfica e a evapotranspiração da região, equação 3.

$$WP = \frac{P}{ETR} \quad (3)$$

Em que:

WP= produtividade hídrica (t/m³)

P= Produção alimentar na região de estudo (tonelada)

ETR= Evapotranspiração real (m³)

Para tal, foram obtidos os dados de produção anual das vegetações forrageiras dos municípios pertencentes à bacia hidrográfica do rio Atibia, fornecidos pelo Instituto de Economia Agrícola IEA da secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo. Para os dados de evapotranspiração real anual, foram utilizados os valores obtidos por meio das modelagens hidrológicas SWAT e CWATM. Se fez possível então diagnosticar a eficiência produtiva da bacia hidrográfica, fornecendo subsídios para a melhor alocação dos recursos hídricos.

Acoplado ao modelo CWATM, será avaliado também a produção energética da bacia hidrográfica por meio da utilização do modelo MESSAGE – modelo de otimização para o planejamento de sistemas energéticos de longo prazo (BUREK, 2018).

5.4. Calibração e validação dos modelos

A partir da correção das séries históricas e análise de sensibilidade, deu-se início ao processo de modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Atibaia, sendo adotado para os modelos um período de 6 anos para o aquecimento, seguido de 6 anos para sua calibração e 5 anos para sua validação. Arnold et al., (2012) afirma que por meio da calibração do modelo hidrológico é possível realizar um diagnóstico do comportamento das séries de resultados obtidos identificando locais que necessitam de ajustes, a fim de se obter resultados satisfatórios para o processo hidrológico estudado. Já a validação é necessária para a verificação do desempenho do modelo hidrológico calibrado em diferentes períodos de tempo e diferentes condições climáticas.

A calibração do modelo SWAT foi realizada de maneira semiautomática por meio da utilização do software SWAT-CUP. Yang et al., (2016) testou diversos

métodos para a calibração dos resultados obtidos pelo modelo SWAT, onde se constatou que o método semiautomático proporcionado pelo algoritmo SUFI2 necessitou-se de um menor número de simulações. Neste processo, é utilizado o método de hipercubo latino para a definição dos parâmetros que serão analisados, sendo que o número de simulações e intervalo dos parâmetros são decididos pelo usuário, a fim de se definir o melhor ajuste (ABBASPOUR et al., 2007). Para a etapa de calibração, foi selecionado o intervalo de dados de vazão mensal compreendidos entre 01/01/2007 e 31/12/2012, enquanto que para a validação do ajuste do modelo foi escolhido o período de 01/01/2013 a 31/12/2017.

A calibração do modelo CWATM foi realizada também de maneira semiautomática por meio da utilização do algoritmo de calibração disponibilizado por (manual modelo), utilizando a função modificada de Kling-Gupta Gupta et al., (2009) adotando como parâmetros de calibração os coeficientes de correlação obtidos entre os valores de vazão observados e simulados, e também o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe. Para a realização da calibração e validação do modelo CWATM foram selecionados os dados no mesmo passo de tempo do modelo SWAT, entre 01/01/2007 e 31/12/2012 para calibração e 01/01/2013 a 31/12/2017 para a validação. Neste estudo, optou-se por trabalhar com três funções objetivo durante as etapas de calibração e validação, sendo elas: Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), Coeficiente de Determinação (R^2), e o Percentual de Viés (PBIAS).

5.5. Balanço energético

O modelo MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) é um modelo, desenvolvido para otimização de sistemas energéticos, sendo utilizado para o planejamento das ofertas e demandas energéticas de médio e longo prazo. O modelo divide o mundo em onze regiões, a fim de se representar o sistema energético global e regional (SULLIVAN; KREY; RIAHI, 2013). Com o modelo MESSAGE segundo Manzoor e Aryanpur (2017), pode-se equacionar e estimar variáveis energéticas como disponibilidade de combustível, regulações ambientais, investimentos e demanda energética. Descreve o sistema

energético, iniciando-se pelos recursos energéticos disponíveis localmente, como corpos hídricos, carvão e gás natural, passando pelos níveis primários e secundários de consumo (conversões, transporte e abastecimento de usinas), até alcançar o usuário final apresentando as demandas, que são divididas pelas diferentes formas de consumo, como energia elétrica, calor e combustível para motores por exemplo, Figura 11.

O sistema energético é representado também para modalidades tecnológicas, como geradores movidos a diesel, turbinas a vapor até geração por meio de painéis fotovoltaicos e geração nuclear. A performance de um método de geração energética é avaliada por meio de análise de ciclo de vida da fonte, levando em consideração as características locais, como disponibilidade de combustível e forma principal de geração energética.

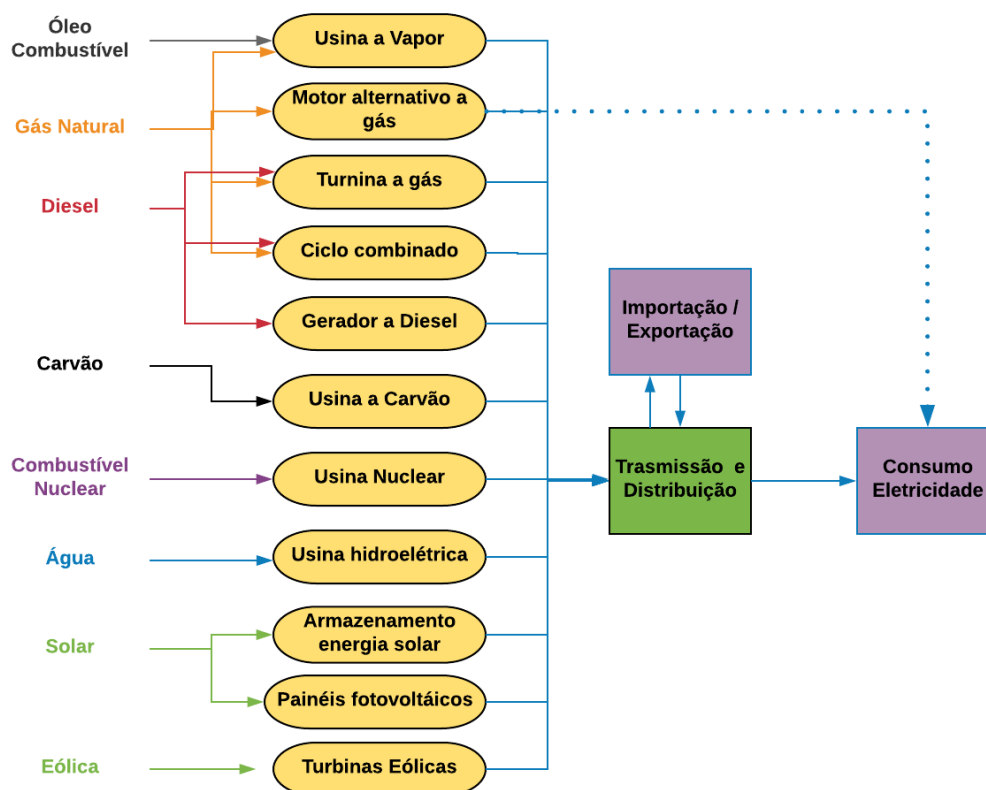


Figura 11: Modelo de cadeia energética
 Fonte: (MANZOOR; ARYANPUR, 2017), Modificado pelo Autor.

5.6. Análise de Envoltória de Dados

A Análise de Envoltória de Dados (AED) é técnica não paramétrica utilizada para analisar o desempenho, em termos de eficiência relativa, de diferentes unidades produtivas que apresentam mesmas características, a partir de um conjunto de grandezas de entrada e saída (LI; HUANG; LI, 2016). Neste trabalho serão utilizadas como unidades produtivas as pequenas sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Atibaia, identificando-se assim as sub-bacias mais eficientes. A análise de envoltória de dados pode ser realizada de forma vertical ou horizontal. A análise vertical analisa a representatividade de cada item em relação a um todo, enquanto a análise de envoltória de dados horizontal compara a evolução de um mesmo item ao longo de um determinado período de tempo.

Para a utilização do método de análise de envoltória de dados, se faz necessário a definição de conceitos fundamentais, sendo eles eficácia, produtividade e eficiência. Segundo (LI; HUANG; LI, 2016) a eficácia está ligada apenas ao que é produzido, sem levar em conta os recursos usados para sua produção. Pode-se dizer que eficácia é a capacidade de a sub-bacia atingir a produção que tinha como meta, em que produtividade é o quociente entre o que foi produzido e o que foi gasto em sua produção, enquanto a eficiência é a comparação entre a produtividade de cada sub-bacia, sendo considerada como sub-bacia eficiente aquela com a maior produtividade.

A eficiência produtiva individual é a relação existente entre a quantidade ou valor produzido (saídas) e a quantidade ou valor dos insumos que são aplicados àquela produção. Foi construída uma fronteira de eficiência, reta que passa pela origem e de declividade igual a produtividade da sub-bacia mais produtiva, a partir das unidades de entrada mais eficientes, sendo a fronteira a representação da máxima produtividade (menor consumo de água para produção de alimento e menor consumo energético) obtida por uma das sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Atibaia, e posteriormente medida a eficiência alcançada pelas demais unidades que estiverem abaixo desta fronteira. A eficiência de uma sub-bacia é, portanto, a razão entre a sua produtividade e a produtividade da sub-bacia mais eficiente. Em casos de múltiplas entradas – relações de interdependência entre água energia e alimento, se faz uma atribuição de pesos (prioridades) por meio de programação linear, entre as entradas

v_i e saídas u_r equações 4 e 5, com o objetivo de se determinar qual parâmetro de entrada e saída causam o maior impacto nas operações analisadas, sendo a eficiência medida por meio da equação 6 (SARRICO, 2001).

$$Entrada = v_i x_{1o} + \dots + v_m x_{mo} \quad (4)$$

$$Saída = u_i y_{1o} + \dots + u_s y_{so} \quad (5)$$

$$Eficiência = \frac{Saída}{Entrada} \quad (6)$$

Desta forma, o cálculo da eficiência para uma determinada sub-bacia será determinado pela equação 7 a seguir.

$$\theta = \frac{u_i y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots} \quad (7)$$

Em que:

u_i = Peso atribuído à saída 1

y_{1j} = Montante de saída 1 da sub-bacia k

v_i = Peso atribuído para entrada 1

x_{1j} = Montante de saída 1 para a sub-bacia k

θ = Eficiência da sub-bacia avaliada

O modelo de envoltória de dados, equação 8, pressupõe que as sub-bacias avaliadas apresentem retornos variáveis de escala, isto é, substitui a premissa da proporcionalidade entre entradas e saídas pelo axioma da convexidade, obrigando que a fronteira de eficiência seja convexa, o que o torna adequado para a avaliação das relações de interdependência entre água, energia e alimento na bacia hidrográfica do rio Atibaia, devido à diferença de grandezas entre as variáveis de entrada, como o consumo hídrico representado em m³, e saída como a produção de alimentos representada em tonelada/hectare. Para a otimização da eficiência de produção de água energia e alimento na bacia hidrográfica, se faz necessário a maior eficiência do uso da água, desta forma a produção será máxima e o consumo de água será mínimo.

$$Minimizar \sum_{i=1}^n v_i x_{io} + v_k \quad (8)$$

Estando sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{r=1}^m u_r y_{rk} = 1$$

$$\sum_{r=1}^m u_r y_{jr} - \sum_{i=1}^n v_i x_{ji} - v_k \leq 0, \quad (k = 1, \dots, n)$$

$$u_r \geq 0 \ (r = 1, \dots, m); \ v_i \geq 0 \ (i = 1, \dots, n); \ v_k \in \mathbb{R}$$

Em que:

y_{rk}, x_{ji} = Produtos y e insumos x

u_r, v_i = Pesos dados ao produto y e ao insumo x

v_k = Variável livre.

Onde é introduzida uma variável v_k representando os retornos variáveis de escala, podendo assumir valores negativos ou positivos.

5.6.1. Variáveis de avaliação

Para a utilização da análise de envoltória de dados, são necessárias as determinações das variáveis de entrada, e das variáveis de saída. Para tanto, foram escolhidas para a avaliação da eficiência entre uso de água e produção de insumos (alimento e energia) as variáveis apresentadas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Entradas e Saídas Análise de envoltória de dados

INSUMO	ENTRADA	SAÍDA
Água	Precipitação	Produtividade hídrica de alimentos
	Evapotranspiração	
	Vazões de referência	Demanda hídrica
Energia e Alimento	Crescimento populacional	Demanda alimentar
	Produção de alimentos	Demanda energética

Fonte: Próprio autor

5.7. Dados utilizados

A seguir serão apresentados os dados utilizados na alimentação de dos modelos hidrológicos SWAT e CWATM, e do modelo energético MESSAGE.

5.7.1. Dados de entrada utilizados nos modelos SWAT e CWATM

Para a aplicação do modelo SWAT e CWATM dois tipos de dados devem ser alimentados, sendo elas variáveis geomorfológicas e atmosféricas, onde serão relacionados apenas os dados referentes a bacia hidrográfica do Rio Atibaia. Os dados serão alimentados com auxílio do software ArcGIS para o SWAT, e por meio de arquivos .csv para o CWATM. Para tal, se faz necessário organizar as informações em formato compatível, *raster* e tabelas. Os dados utilizados, apresentam informações sobre a topografia, pedologia, cobertura vegetal e rede de drenagem, aliados as informações climáticas como séries históricas de temperatura, radiação solar e velocidade do vento. Os dados foram obtidos por meio de consulta em órgãos como ANA, DAEE e INMET.

5.7.1.1. Dados Atmosféricos

Os dados climáticos utilizados neste trabalho, foram obtidos por meio de consulta ao Instituto Nacional de Meteorologia- INMET, e também por meio de consulta a Agência Nacional de Águas-ANA, ao Departamento de Águas e Energia Elétrica-DAEE, e ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas-CIIAGRO. Todas as estações pluviométricas e hidrometeorológicas estão dentro da área de abrangência da bacia hidrográfica do Rio Atibaia. Para a aplicação do modelo, a base de dados utilizados é composta por variáveis climáticas como radiação solar (Kj/m^2), precipitação pluviométrica (mm), temperaturas mínimas, máximas e médias ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s). É importante ressaltar, que todos os dados utilizados são dados de medições diárias, sendo obtido o balanço

hídrico mensal para a bacia hidrográfica do Rio Atibaia. A tabela 4 e figura 12 a seguir, apresentam as estações utilizadas para o estudo em questão.

Tabela 4: Postos pluviométricos e hidrometeorológicos
Fonte: DAEE, ANA, INMET, modificado pelo autor

Nº	PREFIXO	ESTAÇÃO	ALTITUDE (M)	LATITUDE	LONGITUDE
1	D4-004	Americana	549	22°42'43"	47°19'05"
2	E3-074	Atibaia	770	23°09'00"	46°33'00"
3	D3-063	Bragança Paulista	800	22°55'32"	46°32'03"
4	D4-044	Campinas	710	22°52'17"	47°04'39"
5	D4-046	Fazenda Monte D'Este	600	22°46'49"	47°02'17"
6	D4-047	Barão Geraldo	630	22°50'09"	47°04'16"
7	D4-052	Usina Ester	544	22°39'39"	47°13'05"
8	E3-015	Itatiba	780	22°59'04"	46°26'04"
9	D3-042	Jaguariúna	570	22°42'03"	46°58'55"
10	E3-154	Jarinu	730	23°00'00"	46°58'55"
11	D4-111	Sumaré	563	22°50'43"	47°15'44"
12	Valinhos	Valinhos	660	22°58'14"	46°59'45"
13	Jundiaí	Jundiaí	760	23°11'14"	46°53'05"
14	Campo L.	Campo L	740	23°12'20"	46°47'04"
15	Nazaré P	Nazaré P	990	23°09'00"	46°23'45"
16	Joanópolis	Joanópolis	906	22°55'49"	46°16'32"
17	Extrema	Extrema	973	22°53'14"	46°18'00"
18	Itatiba	Itatiba	800	22°58'30"	46°47'30"
19	Camanducaia	Camanducaia	1015	22°47'50"	46°09'45"

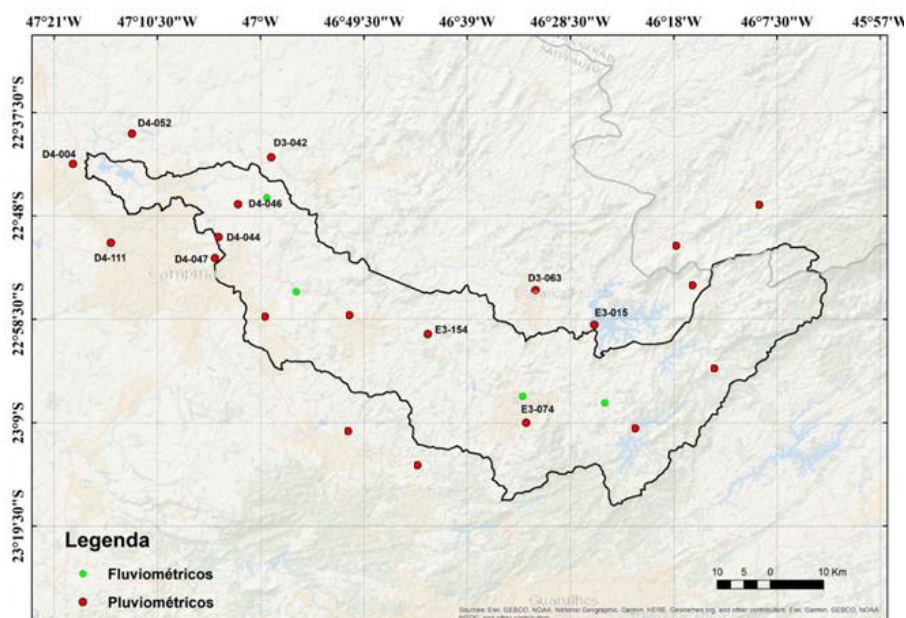


Figura 12: Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos
Fonte: Próprio autor

5.7.1.2. Modelo digital de elevação do terreno

O modelo em questão, utiliza-se de dados referentes a elevação e recorte do terreno. Para tal, foi utilizado o modelo digital de elevação do terreno MDT obtido por meio do satélite ALOS que apresenta resolução espacial de 12,5m. A partir deste MDT, com auxílio do software ArcGIS® foi utilizado o algoritmo *Topo to Raster*, a fim de transforma-lo em um modelo hidrológicamente consistente (MDEHC), onde são eliminados possíveis erros decorrentes do processo de geração e também melhorando a acurácia do modelo. O algoritmo utiliza o método de interpolação do inverso do quadrado da distância, podendo utilizar ainda métodos como a krigagem. O MDEHC pode ser observado na figura 13 a seguir.

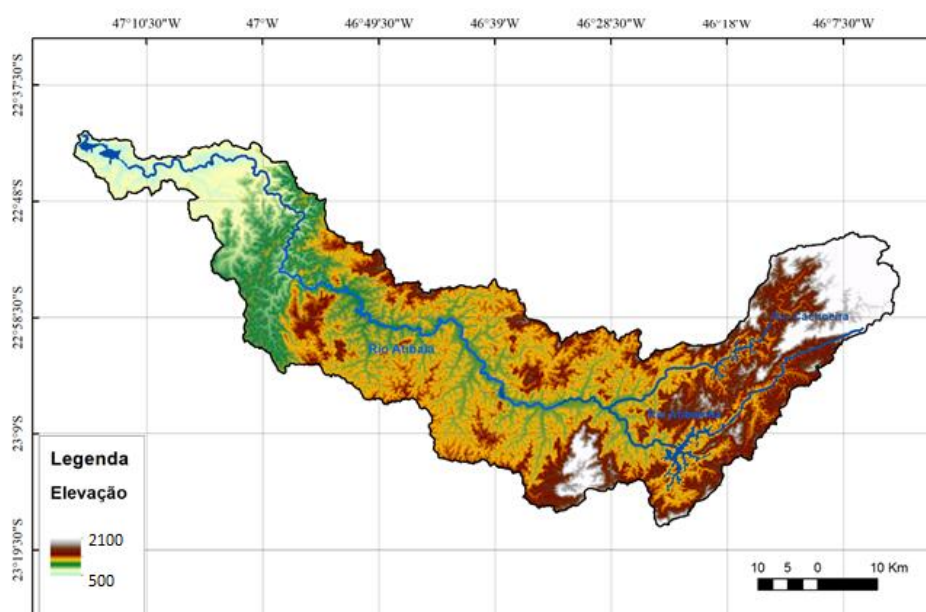


Figura 13: Modelo digital de elevação hidrológicamente consistente da bacia hidrográfica do rio Atibaia
Fonte: Próprio Autor

5.7.2. Dados de entrada utilizados no modelo MESSAGE

Para a realização do balanço energético, foram realizados oito passos, entre ações qualitativas e ações quantitativas, para que se tornasse possível o levantamento e análise dos dados para posterior inserção no modelo energético. A figura 14 a seguir representa os passos seguidos durante a modelagem energética. As etapas qualitativas, Figura 14a, dizem respeito ao levantamento das fontes energéticas primárias da bacia hidrográfica do rio Atibaia, enquanto as etapas quantitativas, Figura 14b, representam o levantamento de dados, equacionamento, inserção das variáveis no modelo energético e a modelagem propriamente dita.

Para a modelagem energética da bacia hidrográfica do rio Atibaia, foram utilizados como padrão para a obtenção das séries energéticas os seguintes valores: Crescimento populacional de 1% ao ano, crescimento do PIB de 6% ao ano, foi adotado também um crescimento linear para a frota de veículos automotivos de até 3 milhões de veículos para o ano de 2030. Para a avaliação da demanda energética residencial, considerou-se como variáveis o crescimento populacional e do número de

moradias, assim como o crescimento da demanda energética per capita até o ano de 2030.

Para a aplicação do modelo MESSAGE são necessários dados de crescimento populacional e produção e demanda energética da região. O modelo será alimentado por meio de arquivos .csv contendo o consumo energético de cada sub-bacia pertencente à bacia hidrográfica do rio Atibaia, assim como a variação do crescimento populacional para os principais municípios da bacia hidrográfica. Serão utilizados dados como o consumo de energia elétrica, produção e consumo de derivados de petróleo e etanol. Tais dados foram obtidos pelos relatórios disponibilizados pela ANEEL, Comitê das bacias do PCJ e pelo Anuário Energético do Estado de São Paulo.

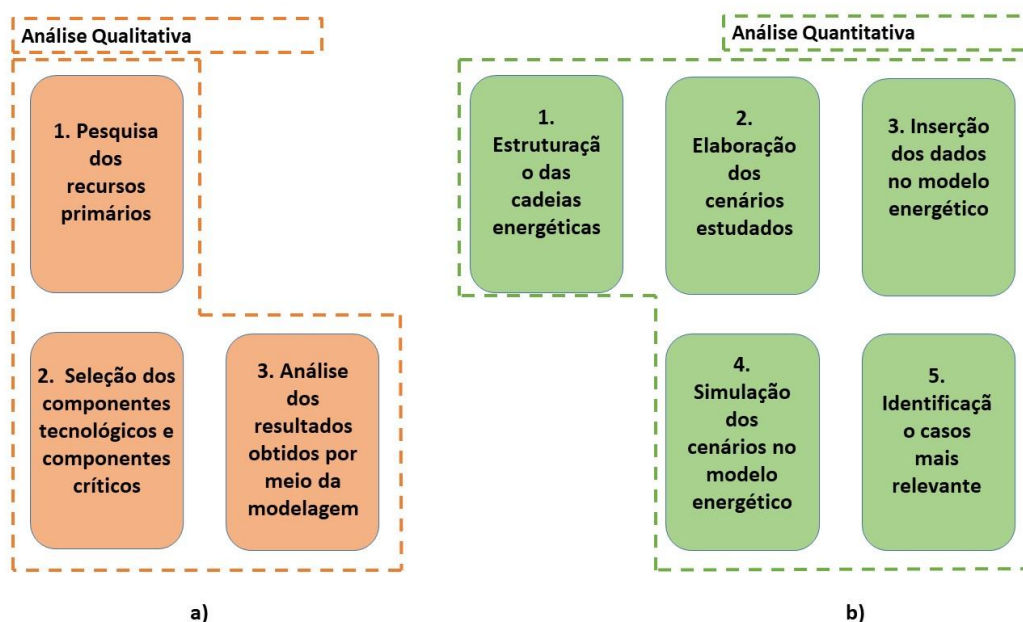


Figura14: Passos seguidos durante modelagem energética: a) análise qualitativa dos dados, b) análise quantitativa dos dados

Fonte: próprio autor

5.7.2.1. Cenários utilizados para a modelagem energética

Foram criados dois cenários para a modelagem energética com base nos estudos de Lucena et al., 2016 e Herreas Martínez et al., 2015). No primeiro cenário

não existem mudanças significativas no perfil energético da região em estudo. A energia elétrica é gerada por meio de hidroelétricas, sendo a matriz de transporte e a frota de veículos dependente dos derivados do petróleo, onde a frota apresenta crescimento exponencial. Não foram consideradas a aplicação de políticas públicas de incentivo do uso de energias alternativas e introdução de novas tecnologias, como veículos elétricos. Já o segundo cenário foi aplicado um caminho de desenvolvimento diferente, assumindo que a redução das emissões de gases estufa será efetiva. Foram assumidas as mesmas taxas de crescimento econômico do cenário anterior. Foi considerado também uma diferente composição da matriz energética, aumentando-se a participação das energias renováveis na produção energética, e sendo estimado um acréscimo do consumo de etanol em 20% até o ano de 2030.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As séries de dados das 19 estações pluviométricas utilizadas foram analisadas a fim de que não apresentassem grandes falhas. Não foram observadas falhas extensas nas series, onde foram encontrados somente 2 dias faltantes no posto pluviométrico de Nazaré Paulista sendo os pontos faltantes preenchidos por meio de análise de estações próximas.

Para a aplicação dos dois modelos hidrológicos, se fez necessária a espacialização das variáveis atmosféricas, sendo utilizado o método de Thiessen. Foram utilizadas séries diárias de precipitação, radiação solar, velocidade do vento e temperatura. A Figura 14 apresenta o resultado da espacialização da precipitação para o dia 01/01/2017 na bacia hidrográfica do rio Atibaia

Durante a modelagem da bacia hidrográfica do rio Atibaia, foram analisadas também as demandas hídricas, em que para o modelo SWAT foram inseridas para cada uma das 22 sub-bacias que foram definidas para a bacia hidrográfica do rio Atibaia. Já para a aplicação do modelo CWATM, as demandas hídricas foram inseridas de forma pontual, devido a divisão infinitesimal de sub-bacias requerida pelo modelo. Foram considerados os pontos de retirada de água constantes no cadastro do DAEE, sendo importante salientar que possam haver divergências entre o número

de pontos outorgados reais e os cadastrados, devido a existência de tomadas de água não registradas.

Para a modelagem das demandas energéticas da bacia hidrográfica do rio Atibaia, foram analisadas as demandas de diferentes tipos de energia, entre eles a energia elétrica, derivados de petróleo e etanol. Os dados das demandas foram divididos em categorias seguindo o mesmo padrão das sub-bacias utilizadas nos modelos hidrológicos, porém categorizadas ainda quanto ao seu tipo de utilização, residencial, industrial e rural. Foram considerados os pontos de consumos que estão registrados no Anuário Energético do Estado de São Paulo, podendo existir divergência entre o número de consumidores reais e cadastrados.

6.1. Análise de Sensibilidade dos modelos hidrológicos

Os resultados obtidos pelos modelos não são igualmente sensíveis aos parâmetros utilizados, podendo variar para diferentes regiões dentro de mesma bacia hidrográfica. Segundo Muleta e Nicklow (2005) identificar quais são os parâmetros mais sensíveis é de extrema importância, pois desta forma se diminui o número de simulações que devem ser realizadas durante a etapa de calibração. Ainda segundo Muleta e Nicklow (2005), a análise de sensibilidade consiste em determinar como o modelo hidrológico responde às alterações realizadas em seus parâmetros de entrada, podendo ser feita de forma global ou pontual.

Para a análise de sensibilidade do modelo SWAT, foram realizadas um total de 200 simulações, onde foram analisados 13 parâmetros, Tabela 5, relacionados ao escoamento superficial e evapotranspiração. Segundo Abbaspour et al., (2007), a sensibilidade dos parâmetros é medida por meio dos valores obtidos nos coeficientes p-val e t-stat, que são ranqueados como sendo os mais sensíveis os parâmetros que apresentarem o maior valor de t-stat, Figura 14, que representa a razão entre o parâmetro utilizado e seu erro padrão, e os que apresentarem o menor valor de p-val, que está relacionado à rejeição da hipótese de que uma alteração no valor do parâmetro gera uma variação significativa no resultado final.

Para o modelo CWATM não foi realizado a análise de sensibilidade, pois para a calibração do modelo são utilizados apenas 6 parâmetros que estão diretamente ligados a vazão e evapotranspiração, tabela 6.

Tabela 5: Parâmetros selecionados, significado e processos relacionados, modelo SWAT
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Parâmetros	Significado	Processos relacionados
ESCO.hru	Evaporação de água do solo	Evapotranspiração
EPCO.hru	Absorção de água pelas plantas transpiração	Evapotranspiração
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)	Escoamento lateral e Percolação
SOL_AWC.sol	Volume de água disponível em cada camada do solo	Percolação
CN2.mgt	Número de curva SCS	Escoamento superficial
ALPHA_BF.gw	Constante de recessão do escoamento de base	Escoamento de base
GW_DELAY.gw	Tempo de atraso água subterrânea	Percolação para o aquífero raso
SLSUBBSN.hru	Declividade média (m)	Escoamento superficial
OV_N.hru	Número de Manning	Escoamento superficial
GWQMN.gw	Limite de profundidade da água no aquífero raso necessária para que o fluxo de retorno ocorra	Percolação para o aquífero raso e profundo

Tabela 6: Parâmetros selecionados, significado e processos relacionados, modelo CWATM
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Parâmetros	Significado	Processos relacionados
CROP_CORRECT	Evaporação da cobertura vegetal	Evapotranspiração
SOILDEPTH_FACTOR	Fator de profundidade das camadas do solo	Infiltração
ARNOBETA_aDD	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)	Escoamento lateral e Percolação
RECESSIONCOEFF_FACTOR	Contribuição do escoamento subterrâneo no escoamento de base	Escoamento de base
RUNOFFCONC_FACTOR	Tempo de concentração	Escoamento superficial
MANNINGSN	Número de Manning	Escoamento superficial

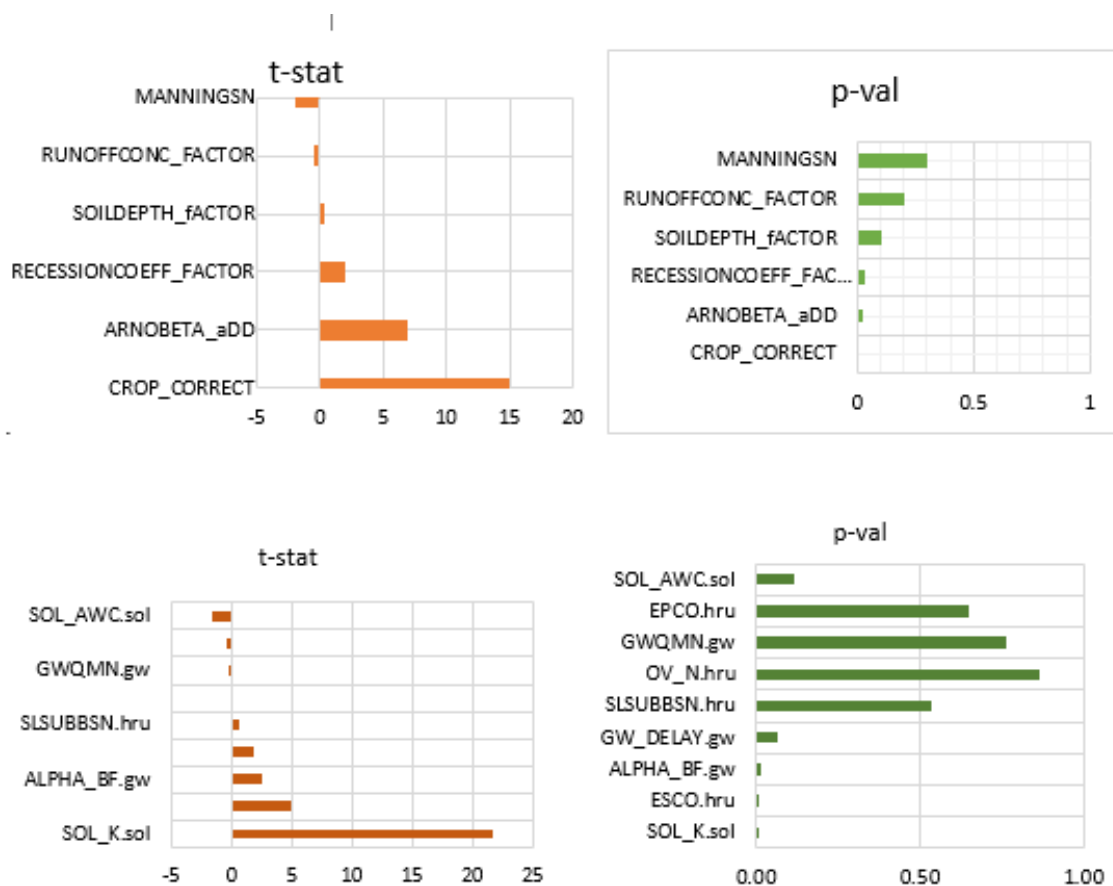


Figura 15: Valores de t-stat e p-val modelos SWAT e CWATM
 Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando a Figura 15, é possível verificar que os parâmetros mais sensíveis para o modelo SWAT foram: Sol_k.hru, Esco.hru, Alpha_bf.gw e Gw_delay.gw, sendo estes diretamente relacionados a evapotranspiração e ao fluxo de água no solo.

6.2. Resultados do Balanço Hídrico

A bacia hidrográfica do rio Atibaia foi calibrada para ambos modelos em quatro postos fluviométricos ao longo do desenvolvimento do rio Atibaia: Paulínia, Valinhos, Itatiba e Atibaia, sendo estes postos escolhidos devido sua importância dentro da bacia hidrográfica, e pela disponibilidade de dados de vazão mensal médios. Foram obtidos resultados satisfatórios para as séries de vazão média mensal, onde foi analisada também o comportamento da bacia hidrográfica para os períodos de cheias e estiagem dentro do ano hidrológico, onde definiu-se “cheia” o período compreendido entre os meses de outubro e março. O primeiro passo para o processo de calibração do modelo SWAT se deu pela análise dos componentes hidrológicos resultantes do processo de simulação, sem a modificação de parâmetros e definições para o cálculo da evapotranspiração e evapotranspiração potencial, onde foi observado uma subestimação para os valores da evapotranspiração da região. Para tanto, foi realizada a calibração manual do parâmetro ESCO, utilizando-se os resultados obtidos por Bressiani et al., (2015), que definiram que para a bacia hidrográfica do rio Piracicaba, localizada na mesma zona climática e trópica que a bacia hidrográfica do rio Atibaia deveria ser utilizado um valor de 0,70. Após a calibração manual deu-se início a fase de calibração e validação semiautomáticas, onde utilizou-se o algoritmo SUFI2 para determinar as fronteiras iniciais de calibração para cada parâmetro. Iniciou-se o processo de calibração e validação pelo exutório da bacia hidrográfica por ser o trecho que apresenta maiores valores de vazão, posto fluviométrico de Paulínia. A Figura 16 a seguir e tabela 7 apresentam os resultados obtidos com a utilização dos modelos SWAT e CWATM para os quatro postos fluviométricos

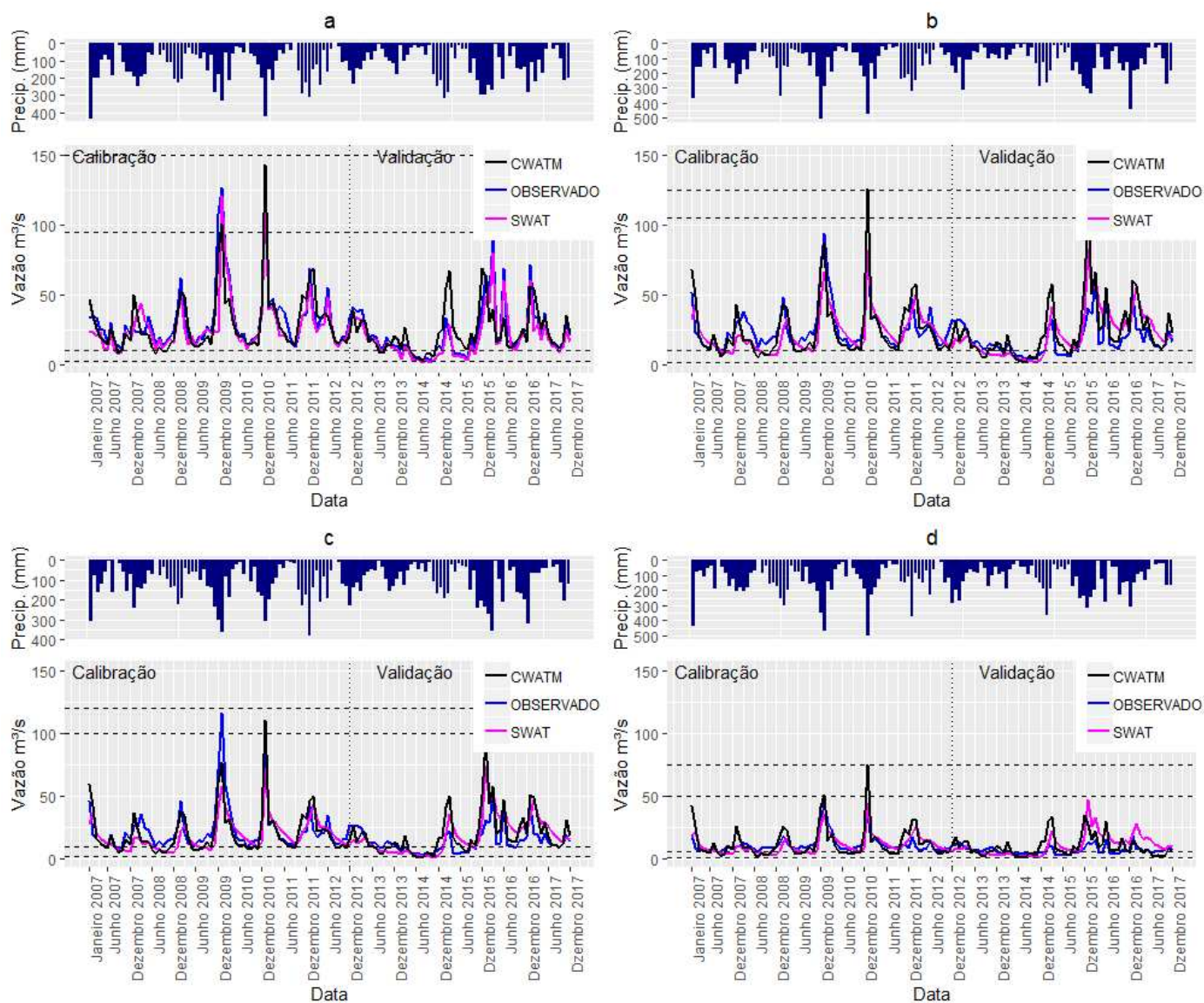


Figura 16: Hietograma, vazões simuladas e observadas - a) posto Paulínia, b) Posto Valinhos, c) Posto Itatiba, d) posto Atibaia

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 7: resultados funções objetivo
 Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Modelo	POSTO	Calibração			Validação		
		R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
SWAT	Campinas	0.81	0.79	-2.60%	0.94	0.89	-1.40%
	Valinhos	0.76	0.73	-7.90%	0.54	0.55	-9.10%
	Itatiba	0.68	0.7	-2.30%	0.6	0.57	-12.50%
	Atibaia	0.6	0.6	-2.11%	0.54	0.51	11.10%
CWATM	Campinas	0.79	0.8	-2.55%	0.93	0.9	-1.55%
	Valinhos	0.73	0.69	-10.10%	0.5	0.5	-10.22%
	Itatiba	0.6	0.65	-3.32%	0.65	0.63	-11.20%
	Atibaia	0.7	0.71	-1.99%	0.54	0.5	8.32%

Pode-se observar pela Figura 16a que a série de vazões modeladas pelo SWAT apresenta seus picos nos meses mais chuvosos, onde é possível determinar por meio do hietograma apresentado, que a série apresenta um comportamento adequado. A série de vazões apresenta dois pontos extremos bem definidos, sendo o ponto de maior vazão no mês de dezembro de 2010, enquanto o ponto de menor vazão se encontra entre o período de “estiagem” no ano de 2014. É possível observar também a presença de um pico de vazão correspondente ao mês de dezembro de 2007, que não condiz com os valores apresentados pelo hietograma, podendo tal discrepância ser explicada pelo método de análise empregado, onde atribuiu-se ao posto fluviométrico em estudo, a série de precipitações do posto pluviométrico mais próximo. Tal pico pode ter sido ocasionado por uma pancada de chuva que não foi computada pelo posto pluviométrico, ou pela limitação do comportamento da bacia hidrográfica que foi representado somente pela sub-bacia pertencente ao posto fluviométrico em questão.

Já para os outros três postos fluviométricos observa-se uma inversão entre os períodos de calibração e validação, onde vazões são superestimadas no período de validação e subestimadas no período de calibração, o que não é representado também pelos hietogramas, visto que o período de validação apresenta uma época de seca, entre os anos de 2012 até o final de 2014, onde as vazões simuladas deveriam ser menores. Para o posto fluviométrico de Atibaia Figura 16d, observa-se

um período de calibração satisfatório, porém para o período de validação apresenta picos de vazão muito superiores aos observados, o que pode representar os efeitos das demandas hídricas de região, sendo possível uma subestimação dos valores reais outorgados. Entre as seções fluviométricas modeladas, é visível a diminuição da qualidade das calibrações e validações conforme o posto fluviométrico analisado se distancia do exutório da bacia hidrográfica. Observa-se ainda a diferença entre os pontos de máximo e mínimo obtidos nas fases de calibração e validação, sendo as maiores discrepâncias para os pontos de máximo obtidas para o posto fluviométrico de Itatiba Figura 16c, e Atibaia, Figura 16d, enquanto o posto de Valinhos, Figura 16b apresenta a maior diferença entre os pontos de mínimo.

Para o modelo CWATM observa-se que para o posto fluviométrico de Paulínia, Figura 16a que a série de vazões obtidas apresenta melhor aproximação para o período de calibração do modelo. Embora a série de vazões apresente uma subestimação no início do período avaliado, ainda se observa que os picos de vazões se concentram nos meses mais chuvosos, representando um comportamento adequado para o mês de dezembro de 2010, porém para o mês de dezembro de 2009 verifica-se que o modelo subestimou as vazões para o período chuvoso, quando comparadas as vazões com os respectivos hietogramas. Para o posto fluviométrico de Valinhos, Figura 16b, observa-se um melhor ajuste da curva de vazões para o período analisado durante a calibração, apresentando menores valores de vazão no período de estiagem para o ano de 2014, entretanto, é possível verificar que as vazões tanto para o período de calibração, quanto de validação apresentaram bom comportamento nos picos, exceto para o período entre 2015 e 2017 não representando a vazão natural do rio Atibaia para a região, apresentando ainda uma grande diferença entre o pico da calibração e validação, e que para o período de calibração foram obtidos valores mínimos de vazão, junho de 2008, praticamente iguais aos do período de estiagem de 2014.

Por estarem localizados próximos, observa-se que o posto fluviométrico de Itatiba. Figura 16c apresentou comportamento semelhante ao posto de Valinhos, porém, para o período de calibração verifica-se que as vazões mais baixas foram melhores determinadas, porém o modelo não obteve êxito ao representar os picos de vazão. Para o posto fluviométrico de Atibaia, Figura 16d, observou-se uma melhor aproximação do modelo para o período de calibração.

O modelo CWATM trabalha com resolução espacial infinitesimal, o que proporciona um número elevado de células hidrológicas ao longo de toda a bacia hidrográfica do rio Atibaia, impossibilitando uma melhor simplificação do método, sendo necessário uma melhor espacialização dos dados climáticos ao longo da bacia. Devido ao acesso limitado de dados atmosféricos, principalmente dados relacionados a evapotranspiração, radiação solar e dados físicos como composição do solo, estima-se que a discrepância entre os valores simulados e observados esteja relacionada ao acúmulo de erros ao longo da distribuição espacial de tais dados.

Assim como observado no modelo SWAT, as demandas hídricas ao longo da bacia hidrográfica afetam de forma significativa as vazões, sendo verificado uma maior sensibilidade do modelo CWATM para a contabilização da água retirada para outorgas, pois como o modelo trabalha em sub-bacias pontuais, a retirada de água pode representar a totalidade de água escoada superficialmente em casa sub-bacia, diminuindo assim os valores obtidos para a simulação da série de vazões. Para verificar o comportamento da série de vazões simuladas, analisou-se o coeficiente de variação (CV), razão do desvio padrão pela média, para os períodos de estiagem e cheia, mostrados na Tabela 8 a seguir

Tabela 8: Coeficiente de variação posto fluviométrico de Paulínia
Fonte: Elaborado pelo autor

SWAT						
	Estiagem			Chuvoso		
CV	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
total	0,28	0,59	-0,70	0,28	1,63	-0,93
Calibração	0,37	0,91	-0,75	0,38	3,70	-1,72
Validação	0,10	0,21	-0,69	0,10	0,13	-0,18
CWATM						
	Estiagem			Chuvoso		
CV	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
Total	0,17	-2,03	1,95	0,17	-2,68	1,74
Calibração	0,21	-1,13	1,19	0,24	-1,60	1,19
Validação	0,10	1,02	1,01	1,02	0,99	5,42

Com os resultados obtidos na Tabela 8, é possível observar que de maneira geral os períodos de estiagem obtiveram um comportamento mais homogêneo (CV menores) que os períodos chuvosos, onde foram obtidos coeficientes de variação maiores. Ainda com a finalidade de se analisar o comportamento das séries obtidas pelos modelos hidrológicos, foram calculados os coeficientes de Nash, R^2 e PBIAS para o posto fluviométrico de Paulínia para os períodos de estiagem e cheia ao longo de toda a série histórica. A Tabela 9 a seguir apresenta os resultados dos coeficientes obtidos para o posto fluviométrico de Paulínia divididos entre os períodos de “cheia” e “estiagem”.

Tabela 9: Coeficientes de Nash, R^2 e PBIAS para o posto fluviométrico de Paulínia
Fonte: Elaborado pelo autor.

SWAT							
Período	DADOS	ESTIAGEM			CHEIA		
Ano		R²	NSE	PBIAS	R²	NSE	PBIAS
2008	CALIBRAÇÃO	0,7	-0,2	-30,9	0,8	0,7	-12,5
2009		0,6	0,5	-6,8	0,4	-2	20,3
2010		0,5	0,3	-2,3	1	0,8	-18,2
2011		1	0,9	-12,9	0,4	0,5	-25,7
2012		0,4	0,3	-28	1	1	-10,7
2013	VALIDAÇÃO	1	0,9	-11,2	0,9	0,9	-8,2
2014		1	0,8	-15,3	1	0,8	-13,7
2015		1	0,5	-34,8	1	0,7	-17
2016		1	0,6	-28,4	0,8	0,7	-22,2
2017		0,8	0,8	-0,9	1	0,9	-19,2
CWATM							
Período	DADOS	ESTIAGEM			CHEIA		
Ano		R²	NSE	PBIAS	R²	NSE	PBIAS
2008	CALIBRAÇÃO	0,5	-10	109,4	0,5	-0,2	-42,0
2009		0,8	-8,5	67,9	1,0	-0,9	-70,0
2010		0,9	-1	56,8	1,0	0,9	26,1
2011		0,9	0,5	-7,3	1,0	0,6	-26,1
2012		1	0,7	-33,2	1,0	1,0	6,3
2013	VALIDAÇÃO	1	0,9	10,8	1,0	0,8	14,6
2014		0,9	0,7	-5,4	0,9	0,9	0,6
2015		1	0,6	-16,4	1,0	0,9	-16,5
2016		0,8	0,8	-35,9	1,0	0,9	-27,6
2017		1	-0,4	50	0,8	0,7	-13,3

Pela Tabela 9 é possível verificar que os resultados da calibração e validação variam conforme o período hidrológico, sofrendo uma pequena variação no período de estiagem para o período de calibração da série. É possível ainda observar que para o ano de pico de 2010 a série de vazões do período chuvoso se adequa muito bem aos valores observados para ambos os modelos, porém o modelo SWAT estima vazões abaixo das reais, enquanto modelo CWATM estima vazões superiores. Para o período de estiagem a série de vazões não foi satisfatória. No ano de 2014, para a série de estiagem (anos de 2013 e 2014) as vazões se adequam de forma satisfatória para os dois modelos, porém o modelo SWAT não representa bem o período de cheias, diferentemente do modelo CWATM que se manteve satisfatório. Tais resultados estão ligados diretamente ao regime de chuvas, sendo o ano de 2010 considerado o mais chuvoso de toda a série histórica analisada, enquanto o ano de 2014 é o ano mais seco.

Pode-se analisar de forma geral o comportamento das séries de vazões obtidas pelos modelos hidrológicos para todos os postos analisados, por meio da Figura 17 a seguir, onde são apresentados os gráficos de dispersão entre os valores simulados de vazão para os dois modelos para os períodos de calibração e validação e suas respectivas retas de regressão linear e intervalos de confiança.

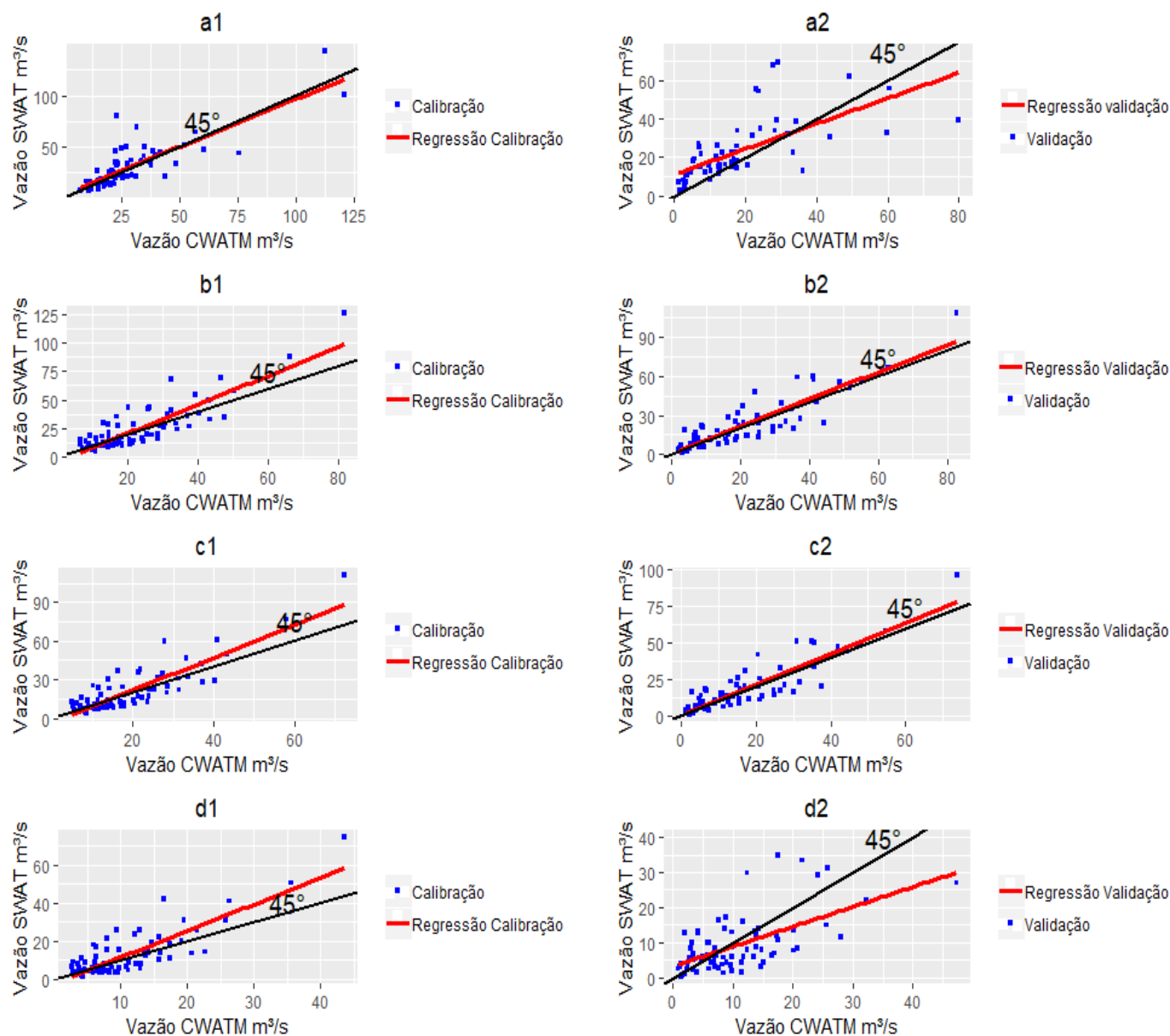


Figura 17: Dispersão das séries simuladas de vazão para os postos fluviométricos analisados para os períodos de calibração e validação, a1) posto Paulínia calibração, b) Posto Valinhos calibração, c) Posto Itatiba calibração, d) posto Atibaia calibração, a2) posto Paulínia validação, b2) Posto Valinhos validação, c2) Posto Itatiba validação, d2) posto Atibaia validação

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se pela Figura 17 a1 para o posto fluviométrico de Paulínia, que os modelos apresentaram uma aderência satisfatória quando comparada sua reta de regressão linear com a reta referência (45°) para o período de calibração. Já para o período de validação, Figura 17 a2, observou-se que houve uma superestimação das vazões menores, e uma subestimação das vazões maiores da série. O mesmo comportamento não pode ser observado para os postos fluviométricos de Valinhos,

Figura 17 b1 e b2, e Itatiba, Figura 17 c1 e c2, onde o período de validação teve aproximação muito boa, sendo observado um pequeno acréscimo nos valores das maiores vazões, e que para o período de calibração a reta de regressão linear se encontra a cima da reta referência, de forma que as vazões simuladas entre os modelos também estão superestimadas, porém a aderência não foi tão satisfatória. Para o posto fluviométrico de Atibaia, Figura 17 d1 e d2, fica claro a inversão de viés para o período de validação ou estiagem acentuado. O posto fluviométrico de Atibaia apresentou a pior aproximação para o período de validação

O balanço hídrico foi discutido a partir das curvas de permanência. As curvas de permanência, Figura 18, para os três postos fluviométricos mais de jusante demonstram que há aderência do modelo histórico para todos os percentis no período de calibração, porém para o período de validação, observa-se para os postos fluviométricos de Valinhos e Itatiba, Figuras 18 b2 e c2 apresentaram superestimação de vazões entre os percentis de 5 e 50 %, porém para os 3 postos verifica-se boa aproximação para a vazão de referência Q95. Ao analisar-se o posto mais a montante, Figura 18 d1 e d2, mostra perda de aderência entre as curvas para os dois períodos também percentis 5 e 50%, que representam os menores intervalos de dias sem chuvas. A demanda hídrica em tais períodos está subestimada no modelo, que por sua vez, superestima a vazão do curso d'água como resultado do balanço entre oferta e demanda.

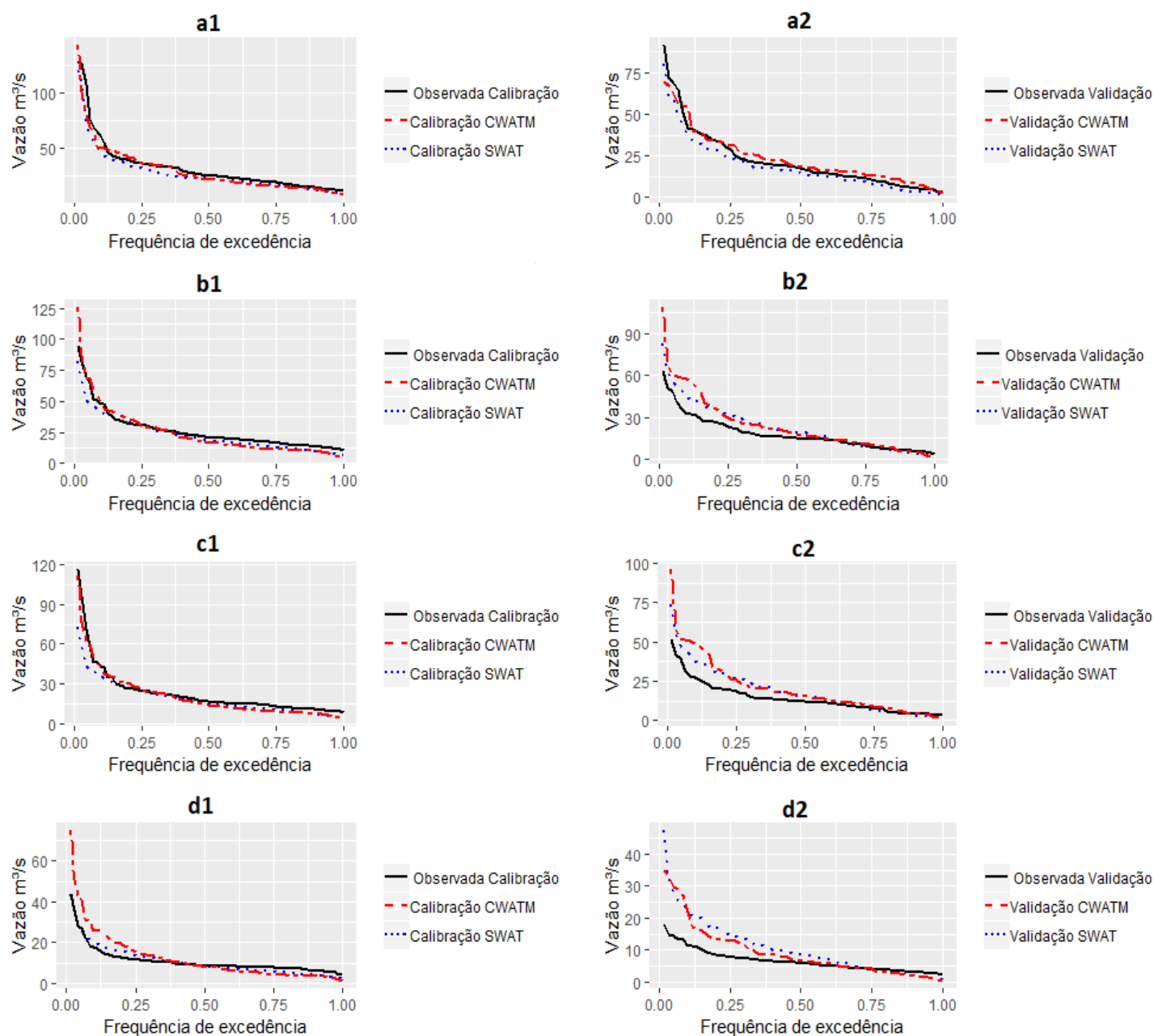


Figura 18: Curvas de permanência, a1) posto Paulínia calibração, b1) Posto Valinhos calibração, c1) Posto Itatiba calibração, d1) posto Atibaia calibração, a2) posto Paulínia validação, b2) Posto Valinhos validação, c2) Posto Itatiba validação, d2) posto Atibaia validação
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se pela Figura 18 o comportamento das vazões ao longo da bacia hidrográfica, em que existe uma diminuição considerável das vazões máximas, cerca de 72% entre a cabeceira, Figura 18 a1, e o início da bacia, Figura 18 d1. Durante os intervalos sem precipitação ocorrem demandas por consumo de água ao longo da bacia hidrográfica, as quais são proporcionalmente relevantes em relação à vazão natural do curso d'água na cabeceira. Para a realização da modelagem da bacia

foram representados pontos de retirada de água outorgados ao longo da bacia hidrográfica. Observou-se que as regiões de Itatiba, Figura 18 c1 e 18 c2, e Atibaia Figura 18 d1 e 18 d2, apresentam a maior concentração de pontos para irrigação. A segunda maior para abastecimento humano da bacia hidrográfica. Somadas apresentam uma retirada de aproximadamente $6,2\text{m}^3/\text{s}$, representando 58% de toda a retirada de água outorgada da bacia. Porém suas contribuições estão subestimadas no modelo, conforme observado pela distância entre as curvas simuladas e observadas para o período de validação. A tabela 10 apresenta a porcentagem correspondente entre as demandas e a vazão de referência Q_{95} .

Tabela 10: % Vazão Q_{95} e Somatório das Demandas
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estações	Paulínia	Valinhos	Itatiba	Atibaia
$\sum D \text{ (m}^3\text{s)}$	3,2	1,28	3,72	2,48
% Q_{95}	49%	23%	92%	88%

Como visto na Figura 17 existe uma inversão na determinação de vazões entre os períodos de calibração e validação, onde os anos de menor precipitação, período entre 2012 e 2016, causam maior impacto nos valores da parte inferior da curva de permanência, geralmente nos percentis acima de 95%, o que devido a inversão observada nos dois modelos não é realidade para o posto montante, sendo os percentis menores produto desta inversão. Para a região montante da bacia, percebe-se uma diminuição de cerca de 37% da precipitação em relação à média das regiões escuras. Para o modelo SWAT não se pode dizer por meio dos resultados modelados para a região do posto fluviométrico de Atibaia que as outorgas presentes e futuras serão atendidas, pois foram obtidas vazões muito superiores as reais. Já para o modelo CWATM observou-se que para os postos de Itatiba e Atibaia, os resultados da modelagem representam vazões muito menores que as observadas, não podendo também afirmar-se que as outorgas presentes e futuras serão atendidas. Por outro lado, foi observado que o balanço hídrico se mostrou satisfatório para os postos jusantes, onde observa-se que as estimativas de vazão do modelo SWAT não foram muito afetadas pelas inversões dos períodos de calibração e validação.

Por meio da modelagem hidrológica simulou-se o comportamento da bacia hidrográfica do rio Atibaia quanto as demandas hídricas para os anos de 2030 e 2050

tomando por base o relatório de situação do comitê de bacias PCJ, onde estima-se um acréscimo de 40% da demanda para o ano de 2030 e de 55% para o ano de 2050. Como resultado, foram obtidas as seguintes proporções em relação à vazão de referência Q_{95} tabela 11.

Tabela 11: projeções demandas e vazões referência
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estações	Paulínia	Valinhos	Itatiba	Atibaia
ΣD 2030 (m ³ s)	4,5	1,80	5,21	3,45
ΣD 2050 (m ³ s)	4,96	1,98	5,77	3,84
% Q_{95} 2030	71%	36%	144%	127%
% Q_{95} 2050	83%	41%	170%	150%

Se faz possível observar pelos resultados da tabela 11 que para as projeções de demanda, existirão regiões pertencentes a bacia hidrográfica do rio Atibaia que terão acréscimos exponenciais do estresse hídrico, como as regiões de Itatiba e Atibaia, que devido ao acréscimo da demanda e redução da vazão de referência (projetada para os anos de 2030 e 2050) apresentarão demandas muito superiores às vazões possíveis.

6.3. Balanço Alimentar

A Figura 19 a seguir apresenta os resultados obtidos para a produtividade hídrica para a produção de cana de açúcar e forragem na bacia hidrográfica do rio Atibaia, observando-se a variação espacial da produção em detalhes, possibilitando sua associação com fatores físicos. É possível utilizar a evapotranspiração potencial como indicativo da demanda hídrica. Por meio da Figura 19a, é possível verificar a espacialização da precipitação média anual da bacia, onde se verifica que as menores chuvas acontecem nas regiões de Campinas, Valinhos e Cosmópolis, sub-bacias 1, 2 e 3, e as maiores nas regiões de Itatiba e Atibaia, sub-bacias 8 e 15. Já pela Figura 19b fica claro que a região montante da bacia apresenta os maiores valores para evapotranspiração potencial, variando entre 1240 e 1270 mm/ano, enquanto que para

a cabeceira observam-se valores entre 1050 e 1200 mm/ano. Nas sub-bacias 1, 2 e 3, Figura 19c, existe a maior concentração de produção total em toneladas por hectares, em média 150 t/ha enquanto que para as sub-bacias 8 e 15 a produção total média gira em torno de 90t/ha, sendo as regiões com maior produção de forrageira. As sub-bacias 4, 5 e 19 apresentam como principal uso do solo a presença de mata nativa. A Figura 19d, apresenta a produtividade hídrica ao longo da bacia, onde observa-se que as regiões de Campinas, Valinhos e Cosmópolis tem a maior produtividade hídrica, média de 0,6 t/m³, enquanto regiões com baixa/média evapotranspiração como Itatiba e Atibaia apresentam produtividade hídrica de 0,035 t/m³. Verifica-se que as regiões que apresentam menor produtividade hídrica são também as que apresentaram menor precipitação média anual.

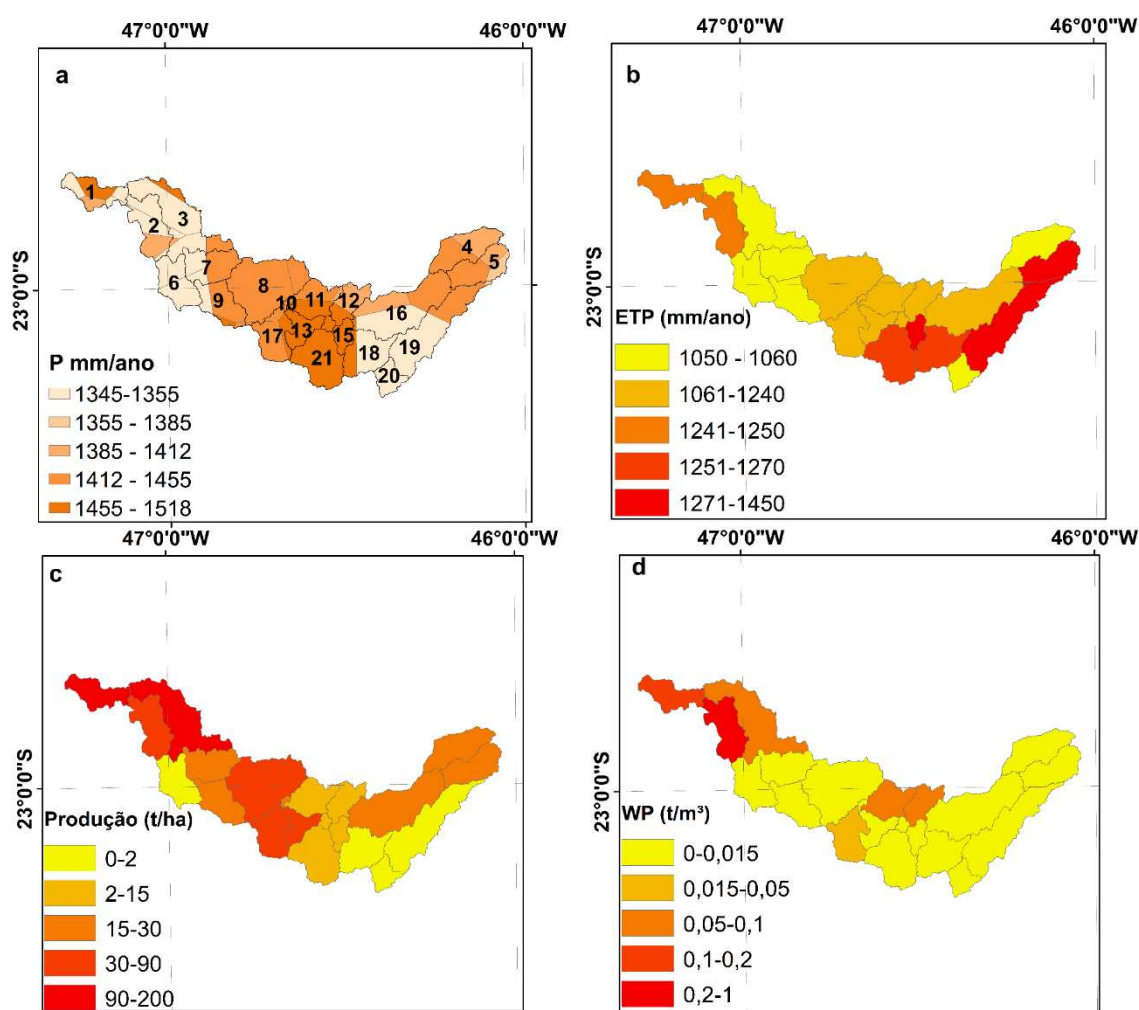


Figura 19: . Produtividade hídrica: (a) sub-bacias, (b) evapotranspiração anual, (c) produção cana de açúcar e pastagem t/ha, (d) produtividade hídrica kg/m³

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 20 a seguir apresenta os resultados obtidos para a produtividade hídrica para a produção de cana de açúcar e forragem na bacia hidrográfica do rio Atibaia para a projeção do ano de 2030. Por meio da Figura 20b observa-se que houve um acréscimo de aproximadamente 10% entre a evapotranspiração para o ano de 2017 e a projeção para 2030. Nas sub-bacias 1, 2 e 3, Figura 20c, existe a maior concentração de produção total em toneladas por hectares, sendo para a projeção esta produção aumentada na mesma proporção do crescimento populacional. A Figura 20d, apresenta a produtividade hídrica ao longo da bacia, onde observa-se uma diminuição de até 50 % quando comparada com o ano de 2017 nas regiões de Campinas e Valinhos (maiores densidades populacionais), enquanto regiões com baixa/média evapotranspiração como Itatiba e Atibaia apresentam acréscimo na produtividade hídrica na proporção de 5 vezes.

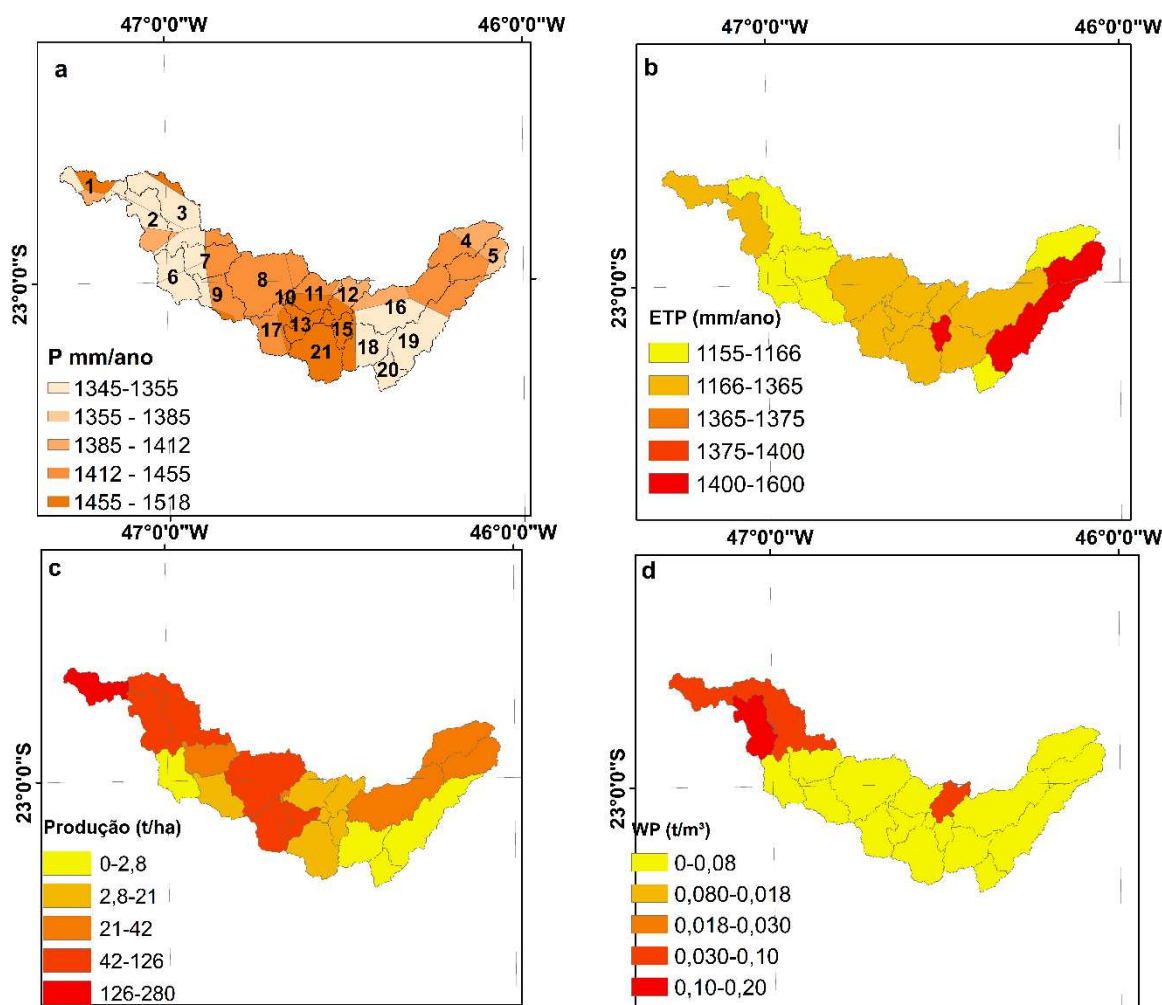


Figura 20: . Produtividade hídrica 2030: (a) sub-bacias, (b) evapotranspiração anual, (c) produção cana de açúcar e pastagem t/ha, (d) produtividade hídrica kg/m³

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4. Balanço energético

Foram realizados os levantamentos da matriz energética da bacia hidrográfica do rio Atibaia, sendo a análise segmentada entre cada tipo de matéria prima e produção. A seguir serão apresentados os dados obtidos para a demanda energética para os municípios pertencentes a bacia hidrográfica.

6.4.1. Energia elétrica

A bacia hidrográfica do rio Atibaia não apresenta geração de energia elétrica por meio de hidroelétricas com potencial elevado, sendo a única estação pertencente à região, localizada no município de americana (porção superior da bacia). A Figura 21 a seguir apresenta o consumo médio em TWh/ano para os municípios pertencentes a bacia hidrográfica, separados por setor de utilização.

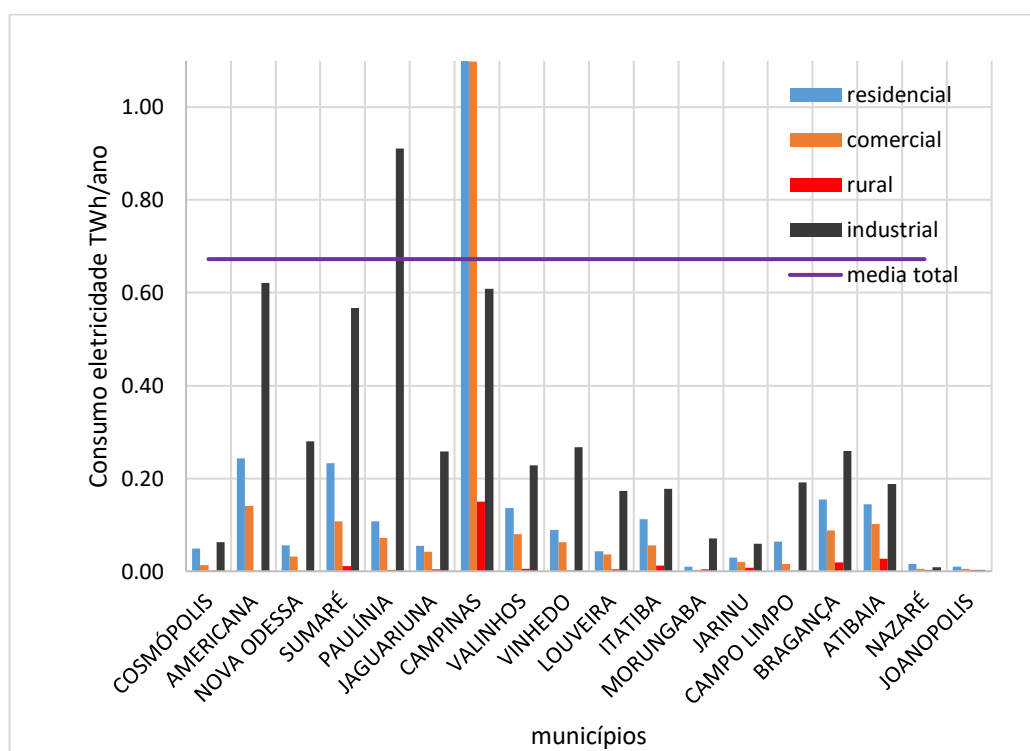


Figura 21: Consumo médio TWh/ano
Fonte: Anuário Energético do estado de São Paulo, elaborado pelo autor.

Observa-se por meio da Figura 21 que o setor de maior consumo energético é o setor industrial, 48,1% da demanda total, seguido pelos setores residenciais e comercial com 24,11% e 18,82% respectivamente. O município de maior consumo industrial é o de Jundiaí apresentando um consumo energético 4 vezes superior à média de consumo do setor, seguido por Paulínia, com um consumo 3 vezes superior à média. Para o consumo residencial, Campinas apresenta o maior consumo, com 1,1 TWh, representando um consumo de aproximadamente 25% do total para o setor, sendo cerca de 116 vezes superior ao município de Joanópolis, menor consumidor da bacia. O consumo comercial apresenta padrões similares ao residencial, tendo como maior consumidor o município de Campinas. O uso rural representa a menor contribuição para a demanda energética, sendo responsável somente por 2,11% de toda a demanda de energia elétrica da região.

6.4.1.1. Derivados do petróleo e etanol

A bacia hidrográfica do rio Atibaia apresenta a maior unidade de refino de petróleo do país, a refinaria de Paulínia, que é responsável por cerca de 20% de todo o processamento de óleo do país. Observou-se que o consumo de combustíveis e derivados do petróleo se divide principalmente entre os setores rural e transporte, sendo a matriz do transporte da região movido a base de combustíveis derivados do petróleo. A Figura 22 a seguir apresenta as demandas para os derivados do petróleo e etanol para os municípios pertencentes a bacia hidrográfica do rio Atibaia.

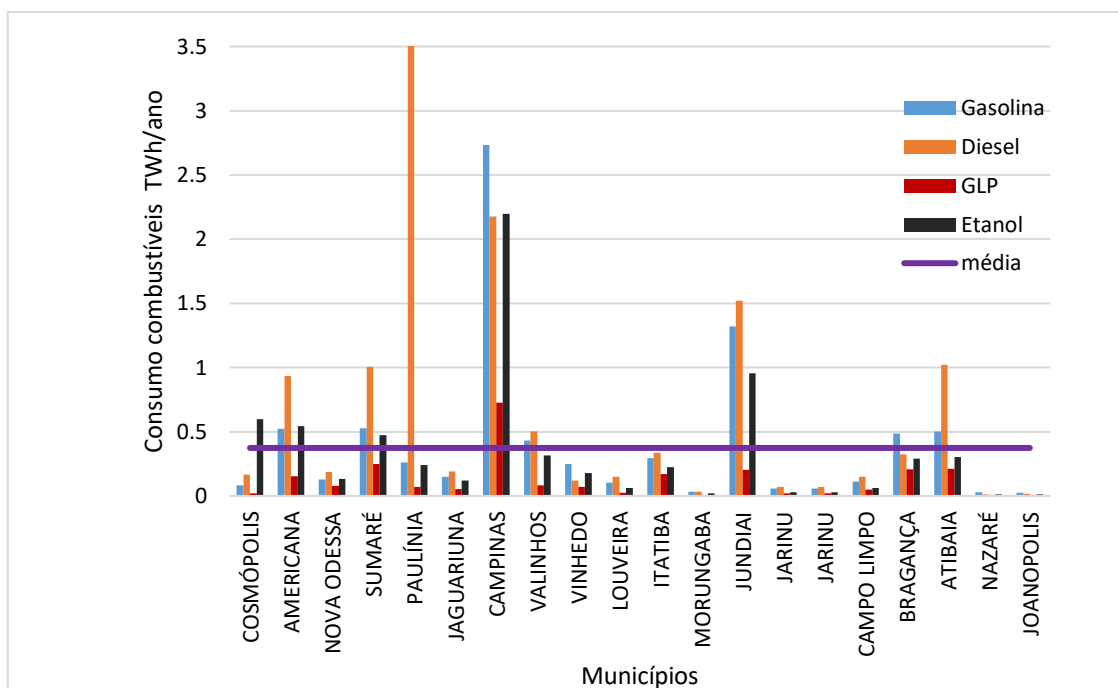


Figura 22: Demanda derivados do petróleo e etanol TWh/ano
 Fonte: Anuário Energético do estado de São Paulo, elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 22, observa-se que a bacia hidrográfica do rio Atibaia apresenta consumo elevado de Diesel, Gasolina e Etanol, sendo os municípios de Paulínia e Campinas os maiores mercados consumidores. Verifica-se que o maior consumidor de óleo diesel é o município de Paulínia, cerca de 6 vezes superior à média o que está diretamente ligado à refinaria Replan, pertencente ao município. Para o município de Campinas, o alto consumo dos derivados de petróleo e etanol estão diretamente ligados a elevada frota de veículos automotores, cerca de 1 milhão de veículos, e a sua produção agrícola, setor que consome energia na forma de diesel e gasolina, para a geração de eletricidade. Observa-se que o consumo de etanol no município de Campinas, representa um consumo cerca de 111 vezes superior ao consumo de Morungaba, menor polo consumidor da bacia hidrográfica.

6.4.2. Cadeia energética modelo MESSAGE

Para a modelagem energética da bacia hidrográfica do rio Atibaia, foi realizado um mapeamento das fontes primárias de energia e suas respectivas formas de produção, para que fosse possível determinar como é realizada a distribuição e utilização energética dentro da bacia, desta forma, foi obtida a cadeia energética apresentada pela Figura 23 a seguir.

Observa-se por exemplo pela Figura 23 a cadeia energética do petróleo. É possível verificar que o recurso natural, presente no pré e pós sal passa primeiramente pelo processo de extração, de onde é retirada a primeira forma de energia primária, sendo este recurso importado pela bacia hidrográfica do rio Atibaia. Após a extração do petróleo cru tem-se o processo de refino, de onde serão retiradas as formas de energia secundárias: Diesel, Gasolina e Gás liquefeito de petróleo. Observa-se então que as formas energéticas secundárias são destinadas ao seu uso final, podendo-se citar como exemplo a utilização da gasolina para o transporte de passageiros por veículos leves, e ainda nos setores da aviação para o transporte de passageiros e cargas e nos setores industriais e rurais.

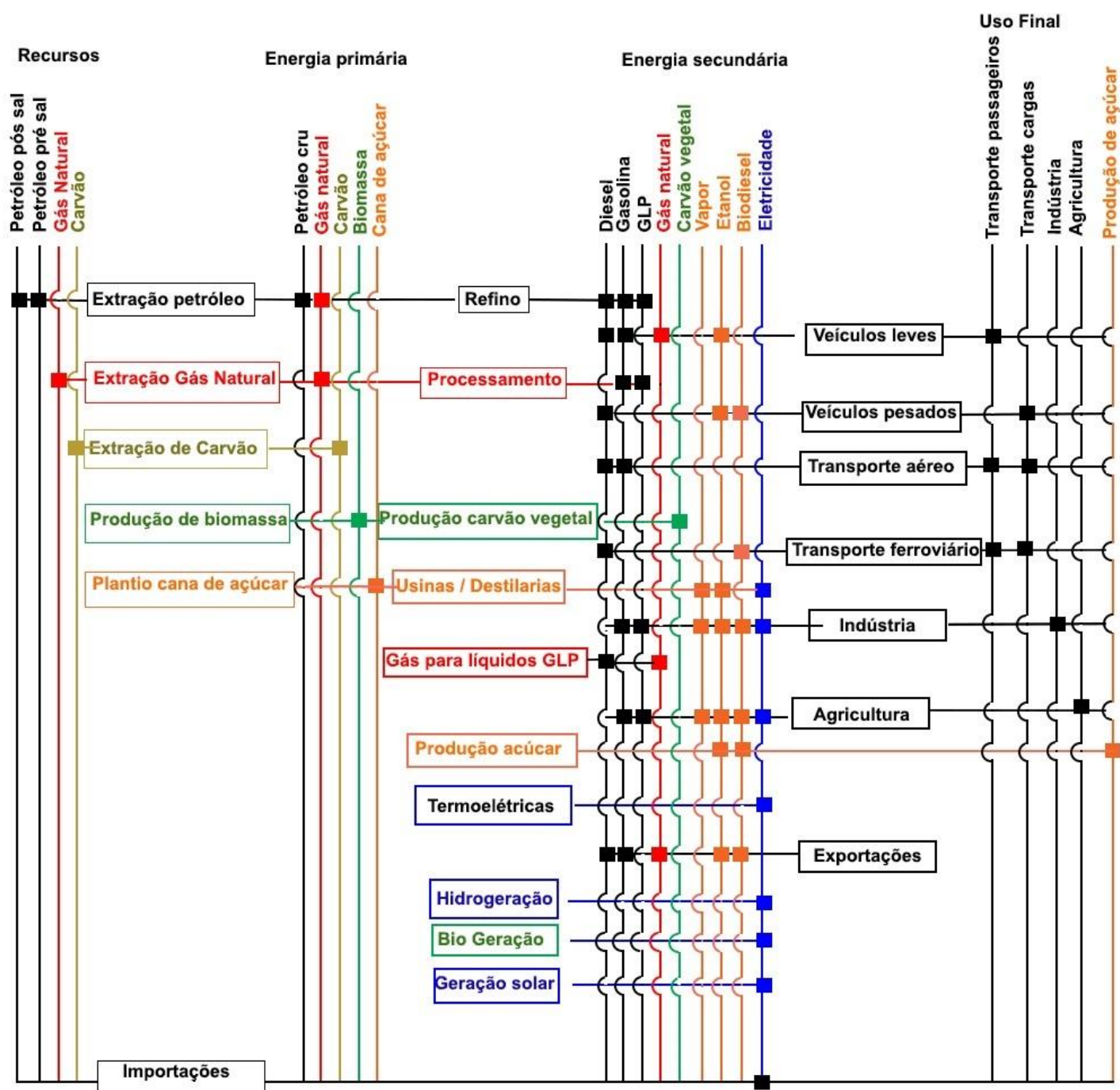


Figura 23: Cadeia energética
Fonte: próprio autor.

6.4.3. Demanda elétrica

Foram analisadas as demandas de duas situações pragmáticas distintas, sendo a primeira situação, uma extrapolação da demanda atual, a segunda situação referente ao cenário de acréscimo de uma matriz energética renovável.

Verificou-se que a demanda por energia elétrica para o primeiro cenário simulado, Figura 24, irá superar a demanda atual no ano de 2023, passando de 30 TWh/ano para aproximadamente 40 TWh/ano, representando um crescimento de 33%. Tal resultado está diretamente ligado ao acréscimo do PIB e do consumo per capita da população. Tal cenário indica a necessidade de implementação de políticas energéticas a fim de mitigar o crescimento da demanda, e expandir a oferta energética.

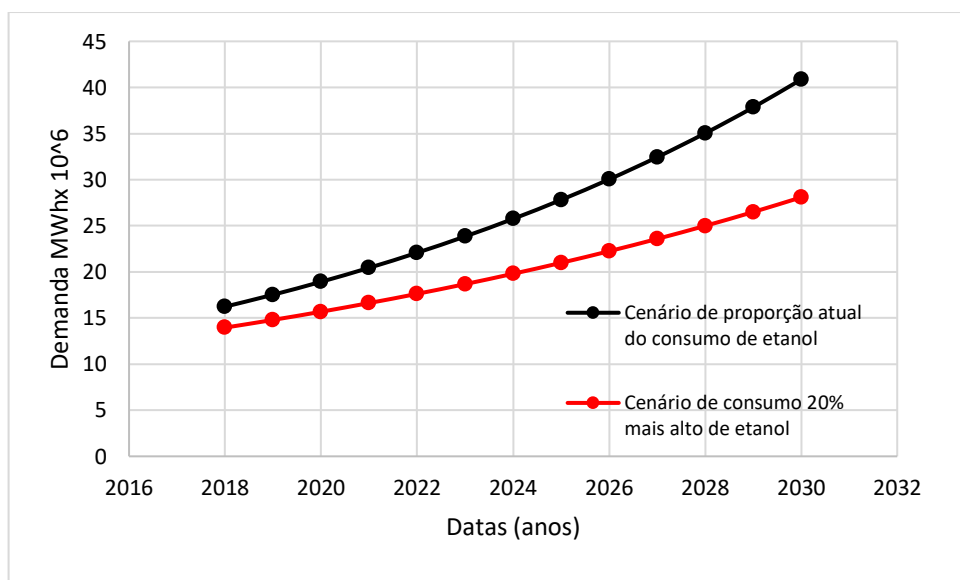


Figura 24: Demanda eletricidade
Fonte: Próprio autor.

Para a segunda situação analisada, aumentando a utilização de energias renováveis, verifica-se que a demanda por energia elétrica é deveras menor, devido as intervenções realizadas quanto a eficiência energética, utilização de placas solares e extinção de bulbos incandescentes, fatores introduzidos durante modelagem energética. Observa-se no segundo cenário, que a demanda energética não supera a extrapolação da demanda atual, e que para o ano de 2030, houve uma redução de 7% entre a demanda atual e a simulada.

6.4.4. Demanda por derivados de petróleo e etanol

A Figura 25 a seguir apresenta as simulações referentes às demandas por derivados de petróleo e etanol, sendo analisados os resultados obtidos em TWh por ano.

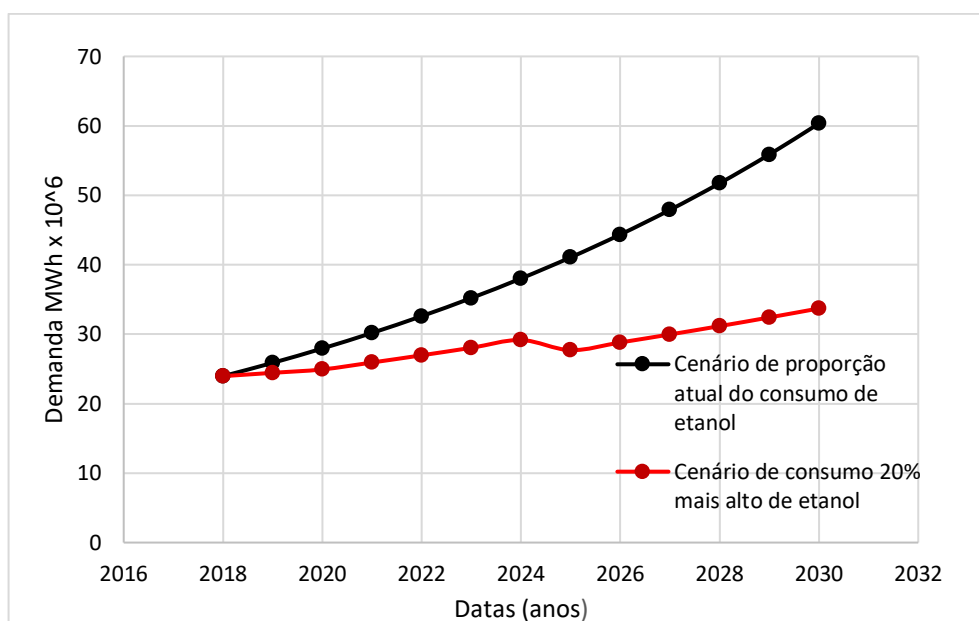


Figura 25: Demanda por derivados de petróleo e etanol TWh/ano
Fonte: próprio autor.

No primeiro cenário, a demanda por derivados de petróleo, utilizado predominantemente na matriz de transporte e no meio rural (geração de eletricidade) apresenta viés de crescimento para o ano de 2030, cerca de 75%, devido ao crescimento elevado da atual frota de veículos. Para o segundo cenário, o crescimento projetado da demanda gira em torno de 25% devido a implantação de políticas de incentivo ao uso de etanol e biodiesel, e pela inserção de fontes renováveis para a geração energética, consequente diminuição do número de termelétricas e substituição por energia solar e/ou eólica.

Já a demanda por etanol, movida pelo acréscimo da frota de veículos aumentará em cerca de 250% para o primeiro cenário, e em torno de 400% no

segundo cenário, movido diretamente pela implementação de políticas públicas de incentivo ao uso do Etanol, Figura 26 a seguir.

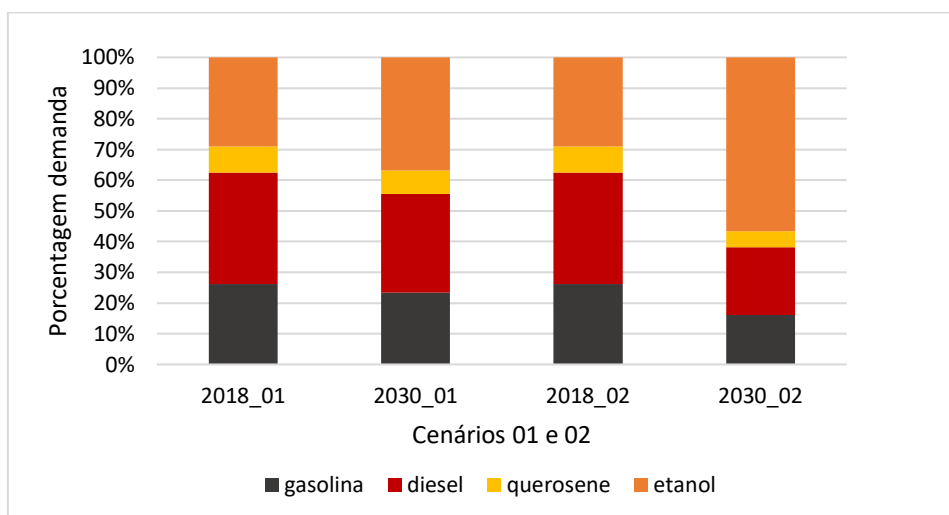


Figura 26: Porcentagem demanda por combustíveis
Fonte: próprio autor.

Analisando ainda os dois cenários, observou-se um leve acréscimo na demanda de gás natural entre o primeiro e segundo cenários, Figura 27, que é facilmente explicado devido a substituição do uso de gasolina e diesel pelo gás natural, representando um acréscimo de aproximadamente 8%.

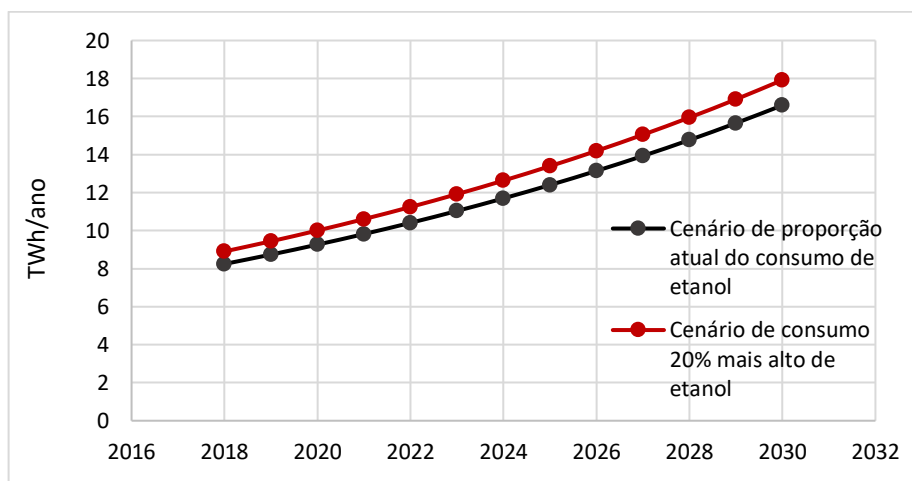


Figura 27: Demanda por gás natural TWh/ano
Fonte: próprio autor.

A tabela 12 a seguir apresenta os resultados obtidos por meio das simulações para os dois cenários.

Tabela 12: projeções demandas eletricidade
Fonte: próprio autor.

Variáveis	Cenários			
	Cenário de proporção atual do consumo de etanol		Cenário de consumo 20% mais alto de etanol	
	2018	2030	2018	2030
Demanda Eletricidade TWh/ano	16,22	40,865	19,29	30,88
Demanda Derivados petróleo e etanol TWh/ano	25	60	25	41
Demanda Etanol TWh/ano	8,66	21,55	8,66	34,90

Observa-se então pela tabela 12 que houve entre os dois cenários estudados uma redução de aproximadamente 10 TWh/ano na demanda por eletricidade, onde, em relação ao ano de 2018 a demanda irá crescer em torno de 251% para o primeiro cenário e 160% para o segundo cenário. Para a demanda de derivados de petróleo, principalmente diesel e gasolina, observa-se uma redução de 25 TWh/ano da demanda, onde, em relação ao ano de 2018 existirá um crescimento de 240% para o primeiro cenário e 140% para o segundo. Verifica-se que a demanda por etanol no segundo cenário representa cerca de 85% da demanda total de derivados de petróleo e etanol, o que mostra a discrepância entre as políticas adotadas em ambos cenários. A demanda por etanol irá crescer em torno de 248% para o primeiro cenário e 403% para o segundo.

6.5. Análise envoltória de dados

Foram realizadas duas análises utilizando-se o modelo da análise envoltória de dados, onde foram analisadas a eficiência de cada região da bacia hidrográfica do rio Atibaia, utilizando-se a mesma divisão de sub-bacias trabalhada no modelo SWAT. A

primeira análise figurou-se na eficiência relacionada às demandas atuais e futuras de água obtidas pela aplicação dos modelos hidrológicos, Figura 28. Enquanto a segunda análise baseou-se no estudo das relações entre água, energia e alimento para o ano de 2030, Figura 29.

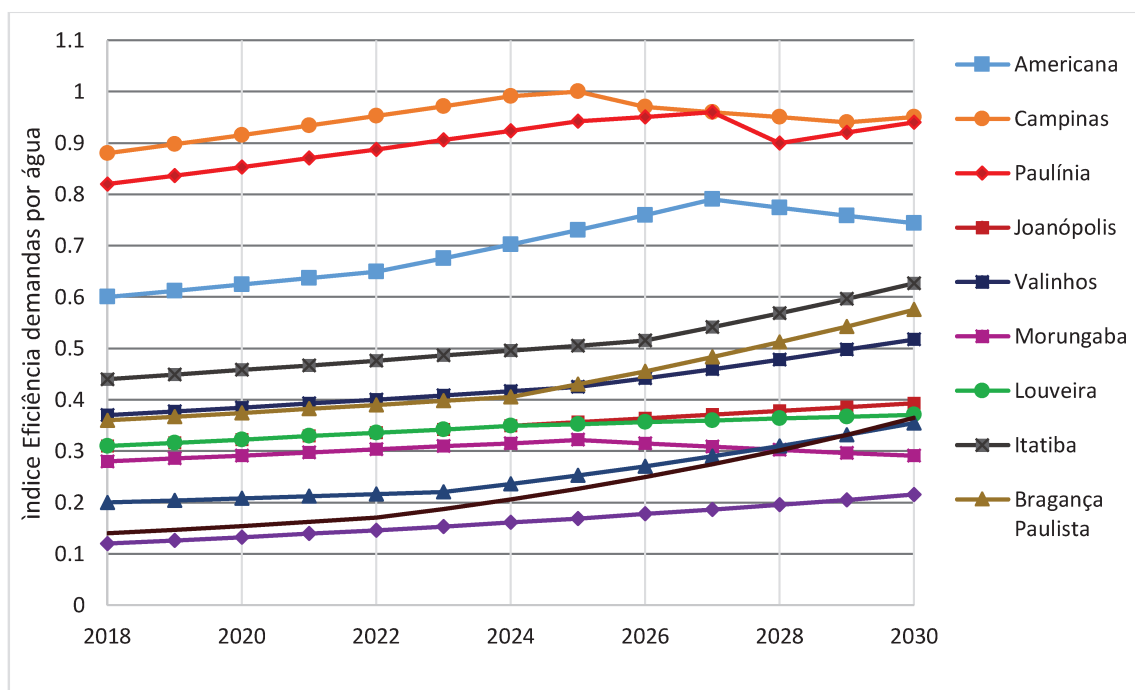


Figura 28: Eficiência- demandas por água atuais e futuras
Fonte: Próprio autor.

Observa-se uma disparidade entre os pontos de maior eficiência, localizados na foz da bacia hidrográfica, e os de menor que estão localizados na parte mais alta da bacia, atingindo uma diferença 4,5 vezes maior para o ano de 2030, entretanto, é possível verificar que tal disparidade vem diminuindo como mostram o comportamento das curvas crescentes. Para os dias atuais verifica-se uma diferença 7,5 vezes maior para o município mais eficiente, Campinas, quando comparado ao município de menor eficiência Jarinu, 0,88 e 0,12 respectivamente. Observa-se que para o ano de 2030 teremos apenas dois municípios atingindo máxima eficiência, sendo eles Campinas e Paulínia. Verifica-se que tais regiões já apresentam elevado crescimento econômico, PIB e grau de desenvolvimento, o que nos leva a crer que as políticas para melhoria do desempenho energético e de consumo se implantadas podem melhorar os índices.

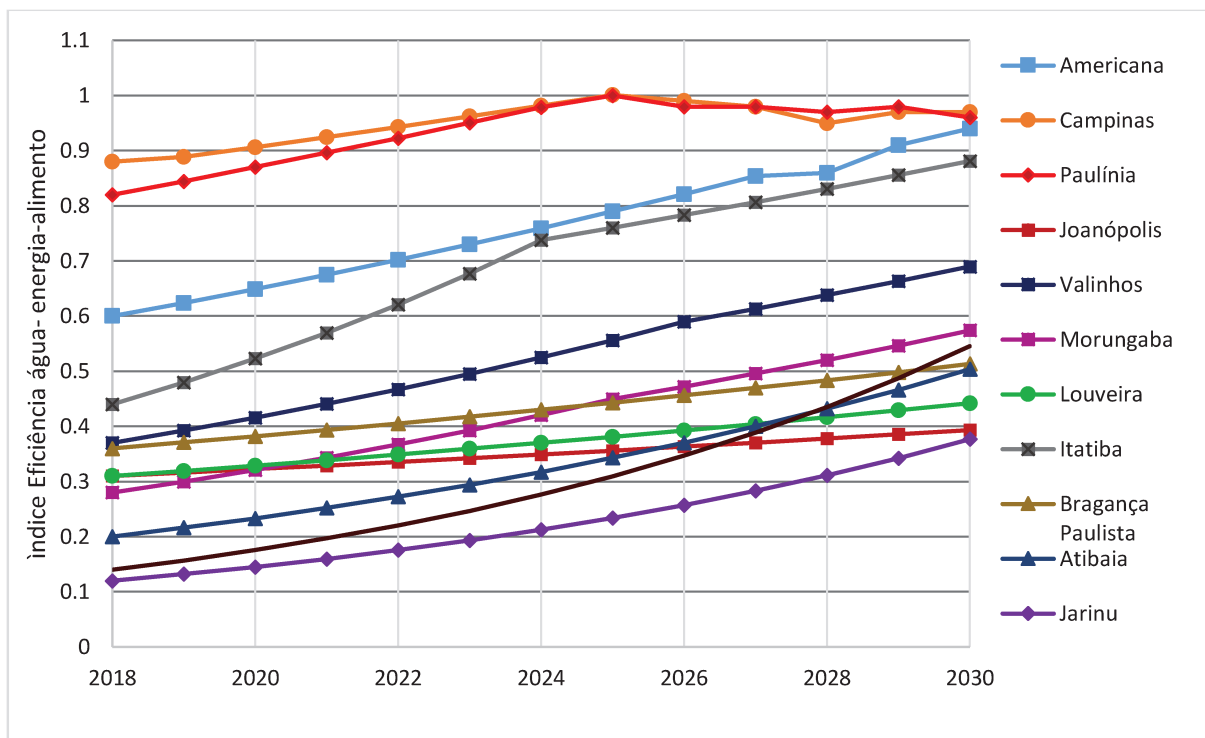


Figura 29: Eficiência- Variação indicadores água-energia-alimento
Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 29 é possível analisar que a relação entre as entradas e saídas (eficiência) aumenta de forma persistente em todas as regiões, menos na região de Campinas e Paulínia. Baseando-se nas curvas da Figura 29 pode-se classificar a região em três diferentes tipos: Estável com alta eficiência, rápido desenvolvimento, porém média eficiência e lento crescimento com baixa eficiência. Considera-se como estáveis de alta eficiência as regiões de Campinas e Paulínia. Americana, Itatiba e Valinhos como rápido desenvolvimento e média eficiência, e o restante da bacia hidrográfica como sendo de lento desenvolvimento e baixa eficiência, com destaque para os municípios de Joanópolis e Jarinu. Observa-se um pico de eficiência no ano de 2025 para as regiões de Campinas e Paulínia, que ocorre devido ao desenvolvimento econômico da região. A partir do ano de 2026 a série de eficiência para estas regiões sofre uma leve queda, que pode ser explicada pelo aumento esperado da população para estas áreas, assim como uma elevação na demanda por recursos hídricos.

As regiões com alta eficiência apresentam maior desenvolvimento econômico, urbanístico, tecnológico, e apresentam maiores atrativos para a força de trabalho. As regiões de média eficiência apresentam áreas em constante desenvolvimento, porém

ainda são consumidores de energia, principalmente no setor industrial apresentando consumo de derivados de petróleo acima da média, o que prejudica a eficiência da região quando analisado o índice de eficiência energética. Por fim, as regiões de lento desenvolvimento apresentam economia voltada para a produção agrícola, com baixa urbanização, porém elevado consumo de diesel, etanol e gasolina, e baixa eficiência na relação entre demanda hídrica e produção de alimentos.

A figura 30 a seguir representa as envoltórias de somatório de demandas por água obtidas para o cenário de consumo atual e para o cenário de otimização das relações de interdependência entre água energia e alimento.

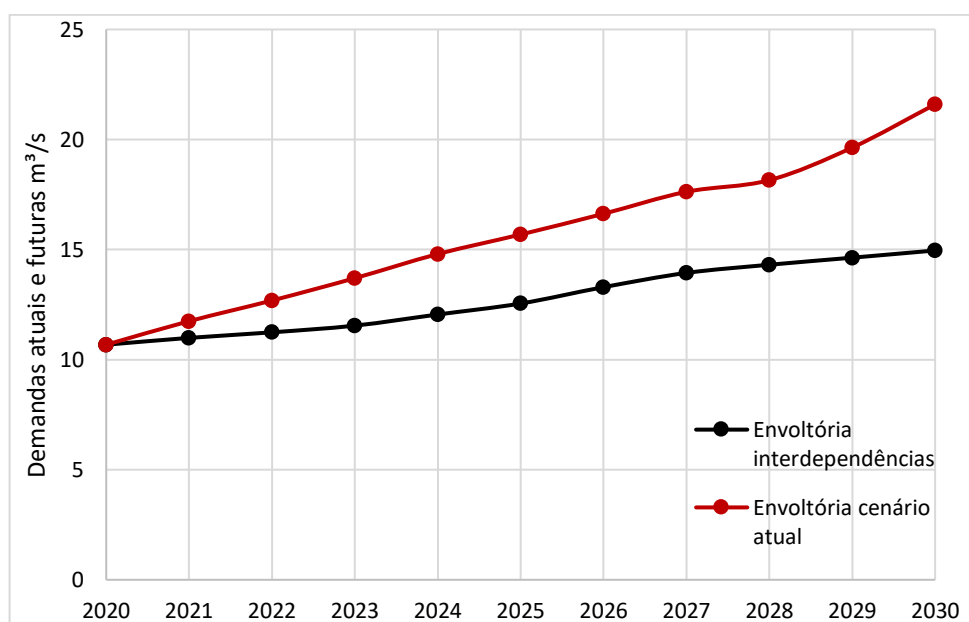


Figura 30: Comparação envoltórias de dados, somatório das demandas por água nos 2 cenários estudados

Fonte: Próprio autor.

Observa-se pela figura 30 que existe uma diferença entre o somatório das demandas por água quando comparadas o cenário atual e o cenário de otimização das relações entre água, energia e alimento. Verifica-se que para o ano de 2030 a demanda por água no cenário atual será cerca de 44% superior à demanda do cenário otimizado, o que representa um acréscimo de aproximadamente 7m³/s no padrão de consumo. A envoltória que representa o cenário atual, mostra que as demandas por recursos hídricos irão dobrar entre os anos de 2020 e 2030, enquanto que otimizadas as relações entre água, energia e alimento observou-se uma evolução de apenas 40% no consumo de água.

7. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos na elaboração deste estudo foi possível primeiramente concluir que a combinação de modelos hidrológicos semi-distribuídos de transformação chuva-vazão (SWAT e CWATM) com modelos de demanda hidrológica (MESSAGE) para a análise das relações de interdependência entre água, energia e alimento foi satisfatória, sendo possível determinar as demandas e interações entre os três recursos para diferentes cenários dentro da bacia hidrográfica do rio Atibaia.

Os modelos hidrológicos SWAT e CWATM foram eficientes em suas representações da bacia hidrográfica do rio Atibaia, porém apresentaram algumas discrepâncias para os períodos de estiagem, onde verificou-se que o modelo SWAT conseguiu atingir melhor aproximação para os picos de vazão, enquanto o modelo CWATM superestimou as vazões. Já para os períodos de cheia, ambos os modelos obtiveram comportamentos semelhantes.

Os resultados da modelagem hidrológica demonstraram que existem regiões na bacia hidrográfica que apresentam consumo elevado de água, onde a demanda representa quase 100% da vazão de referência Q_{95} para o período atual, valores estes significativos pois não foram analisadas as demandas hídricas não cadastradas, o que elevaria o consumo em todas as regiões. Tais regiões podem ser então consideradas como regiões de estresse hídrico, pois verificou-se que a vazão de referência não será suficiente para suprir as demandas futuras.

Analisando-se o balanço alimentar concluiu-se que existem pontos de maior e menor produtividade hídrica na bacia, casos de Campinas e Atibaia. Verificou-se que o maior consumo hídrico não se reverte na maior produtividade hídrica, sendo observada atualmente uma diferença de 40% entre as produções totais de alimento entre as regiões de Campinas e Atibaia, representando uma produtividade hídrica 6 vezes menor. Porém, estimou-se que a produtividade hídrica irá diminuir para as regiões da cabeceira da bacia hidrográfica devido ao crescimento populacional e diminuição das áreas disponíveis para o cultivo, enquanto que para as regiões mais a montante da bacia a produtividade irá aumentar cerca de 5 vezes.

Por meio da análise da cadeia energética foi possível determinar a matriz energética da bacia hidrográfica, sendo então verificado que a região se apresenta

como importadora de energia elétrica e exportadora de produtos derivados do petróleo. Os resultados obtidos pelo modelo MESSAGE demonstraram a diferença na demanda por fontes de energia para dois cenários distintos, que, juntamente com a análise de envoltória de dados mostrou como as demandas pelos recursos hídricos é afetada quando a matriz energética atual é mantida e quando se reduz o consumo de combustíveis fósseis e aumenta-se o consumo de etanol. Foi observada uma variação de cerca de 44% entre as demandas de água para o ano de 2030, sendo observado ainda que as demandas por água poderão dobrar entre os anos de 2020 e 2030 se mantidos os padrões de consumo energéticos atuais.

Analisando-se os modelos hidrológicos de forma conjunta, foi possível determinar regiões de maior e menor eficiência para as relações entre água, energia e alimento, observando-se em quais regiões o estresse hídrico é presente e quais o apresentarão em um curto período de tempo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, fev. 2007.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. v. 20, n. 1, p. 9, 2017.
- BRESSIANI, D. DE A. et al. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **Biol Eng**, v. 8, p. 15, 2015.
- BUREK, P. **CWATM Documentation**, 26 ago. 2018.
- CAI, X. et al. Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for water resources research. **Advances in Water Resources**, v. 111, p. 259–273, jan. 2018.
- CBH-PCJ. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiaí. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**, v. Relatório Final, 2018.
- DAEE. Relatório Final. **Diagnóstico Agroambiental para Gestão e Monitoramento da Bacia do Rio Jundiaí Mirim**, 2003.
- DAHER, B. T.; MOHTAR, R. H. Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. **Water International**, v. 40, n. 5–6, p. 748–771, 19 set. 2015.
- DEMANBORO, A. C.; LAURENTIS, G. L.; BETTINE, S. DO C. Cenários ambientais na bacia do rio Atibaia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 27–37, 2013.
- DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001–1007, 2015.
- FALKENMARK, M.; MOLDEN, D. Wake Up to Realities of River Basin Closure. **International Journal of Water Resources Development**, v. 24, n. 2, p. 201–215, jun. 2008.

- GAO, J. et al. Optimizing Regional Food and Energy Production under Limited Water Availability through Integrated Modeling. **Sustainability**, v. 10, n. 6, p. 1689, 23 maio 2018.
- GHEEWALA, S. et al. Water Footprint and Impact of Water Consumption for Food, Feed, Fuel Crops Production in Thailand. **Water**, v. 6, n. 6, p. 1698–1718, 16 jun. 2014.
- GU, A.; TENG, F.; WANG, Y. China energy-water nexus: Assessing the water-saving synergy effects of energy-saving policies during the eleventh Five-year Plan. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 630–637, set. 2014.
- GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, out. 2009.
- HERRERAS MARTÍNEZ, S. et al. Possible energy futures for Brazil and Latin America in conservative and stringent mitigation pathways up to 2050. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 98, p. 186–210, set. 2015.
- IRRIGART. Relatório Situação. **Relatório de Situação das Bacias PCJ**, 2010.
- J. G. ARNOLD et al. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.
- KARABULUT, A. et al. Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water–food–energy nexus in the Danube river basin. **Ecosystem Services**, v. 17, p. 278–292, fev. 2016.
- KESKINEN, M. et al. The Water-Energy-Food Nexus and the Transboundary Context: Insights from Large Asian Rivers. **Water**, v. 8, n. 5, p. 193, 10 maio 2016.
- LI, G.; HUANG, D.; LI, Y. China's Input-Output Efficiency of Water-Energy-Food Nexus Based on the Data Envelopment Analysis (DEA) Model. **Sustainability**, v. 8, n. 9, p. 927, 12 set. 2016.
- LIU, J.; SAVENIJE, H. H. G. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, p. 12, 2008.
- LIU, Y. et al. Global and Regional Evaluation of Energy for Water. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 17, p. 9736–9745, 6 set. 2016.
- LUCENA, A. F. P. et al. Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy. **Energy Economics**, v. 56, p. 564–574, maio 2016.
- MANZOOR, D.; ARYANPUR, V. Power sector development in Iran: A retrospective optimization approach. **Energy**, v. 140, p. 330–339, dez. 2017.

- MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**, v. 306, n. 1–4, p. 127–145, maio 2005.
- RAFIEE, S.; MOUSAVI AVVAL, S. H.; MOHAMMADI, A. Modeling and sensitivity analysis of energy inputs for apple production in Iran. **Energy**, v. 35, n. 8, p. 3301–3306, ago. 2010.
- ROSSI, M. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado**, 2017.
- SANASA. Relatório de Sustentabilidade/GRI 2016. **Direitos Humanos à Água Potável e ao Saneamento Básico**, 2016.
- SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 578–590, 2009.
- SARRICO, C. S. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. **Journal of the Operational Research Society**, v. 52, n. 12, p. 1408–1409, dez. 2001.
- SCANLON, B. R. et al. The food-energy-water nexus: Transforming science for society: FOOD, ENERGY, WATER NEXUS. **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 3550–3556, maio 2017.
- SHARMA, B. et al. The Indus and the Ganges: river basins under extreme pressure. **Water International**, v. 35, n. 5, p. 493–521, nov. 2010.
- SIDDIQI, A.; KAJENTHIRA, A.; ANADÓN, L. D. Bridging decision networks for integrated water and energy planning. **Energy Strategy Reviews**, v. 2, n. 1, p. 46–58, jun. 2013.
- SNSA; MCIDADES. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos -2015**, 2017.
- SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K.; WHEATER, H. **Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**. 1. ed. New York: Cambridge University, 2008. v. 1
- SULLIVAN, P.; KREY, V.; RIAHI, K. Impacts of considering electric sector variability and reliability in the MESSAGE model. **Energy Strategy Reviews**, v. 1, n. 3, p. 157–163, mar. 2013.
- TODINI, E. The ARNO rainfall—runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1–4, p. 339–382, fev. 1996.

- TOM, M. S.; FISCHBECK, P. S.; HENDRICKSON, C. T. Energy use, blue water footprint, and greenhouse gas emissions for current food consumption patterns and dietary recommendations in the US. **Environment Systems and Decisions**, v. 36, n. 1, p. 92–103, mar. 2016.
- TUCCI, C.; PARRAGA, E.; GOLDENFUM, J. Regionalização de Vazões com Base em Séries Estendidas: Bacias Afluentes à Lagoa Mirim, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 1, p. 57–75, 1999.
- WANG, S.; CHEN, B. Energy–water nexus of urban agglomeration based on multiregional input–output tables and ecological network analysis: A case study of the Beijing–Tianjin–Hebei region. **Applied Energy**, v. 178, p. 773–783, set. 2016.
- WEBBER, M. E. A Puzzle for the Planet. **Scientific American**, v. 312, n. 2, p. 62–67, 20 jan. 2015.
- WHATELY, M.; CUNHA, P. Um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo. p. 68, 2007.
- YANG, H.; ZHOU, Y.; LIU, J. Land and water requirements of biofuel and implications for food supply and the environment in China. **Energy Policy**, v. 37, n. 5, p. 1876–1885, maio 2009.
- YANG, Y. C. E. et al. Modeling the Agricultural Water–Energy–Food Nexus in the Indus River Basin, Pakistan. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 12, p. 04016062, dez. 2016.
- ZHANG, C. et al. Managing Scarce Water Resources in China’s Coal Power Industry. **Environmental Management**, v. 57, n. 6, p. 1188–1203, jun. 2016.
- ZHANG, J. et al. The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. **Applied Energy**, v. 227, p. 449–464, out. 2018.