UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

ALBA MARIA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A AGRICULTURA E OS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO ALTO PARANAPANEMA, SÃO PAULO: UM ENFOQUE DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Botucatu
2022

ALBA MARIA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A AGRICULTURA E OS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO ALTO PARANAPANEMA, SÃO PAULO: UM ENFOQUE DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola).

Orientador:Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Botucatu

2022

G643a

González, Alba Maria Guadalupe Orellana
Avaliação de impactos de mudanças climáticas sobre a agricultura e os recursos hídricos na bacia do Alto Paranapanema, São Paulo : um enfoque de dinâmica de sistemas / Alba Maria Guadalupe Orellana González. -- Botucatu, 2022
99 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: João Carlos Cury Saad

1. Balanço hídrico. 2. Impactos climáticos. 3. Pensamento sistêmico. 4. STELLA. 5. Gestão de recursos hídricos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A AGRICULTURA E OS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO ALTO PARANAPANEMA, SÃO PAULO: UM ENFOQUE DE DINÂMICA DE SISTEMAS

AUTORA: ALBA MARIA GUADALUPE ORELLANA GONZÁLEZ
ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participaçao Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu UNESP

Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participaçao Virtual) p/
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Dr. JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ (Participaçao Virtual) p/
. / Quimea Inteligência Ambiental

Dr. JUAN SINFORIANO DELGADO ROJAS (Participaçao Virtual) p/
. / Agro Ambiência Serv. Agr. Ltda

Dr.ª MARIA JOSÉ BRITO ZAKIA (Participaçao Virtual) p/
. / Práxis Assessoria Socioambiental

Botucatu, 04 de novembro de 2022

AGRADECIMENTOS

A Deus que em sua infinita misericórdia tem-me permitido concluir este importante projeto.

A miha familia pelo amor, apoio e paciência em especial a meu esposo Rodrigo e a meu filho Alejandro.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela orientação, amizade, ensinamentos e exemplo de professor.

A todos os professores e funcionários da FCA.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

Esta pesquisa teve o objetivo de formular um modelo geral utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas e o *software* STELLA, composto por submodelos específicos, para avaliar os impactos causados por mudanças climáticas globais, manifestadas em alterações na pluviosidade, sobre a agricultura irrigada e os recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (BH do ALPA), SP. O processo de desenvolvimento do modelo foi dividido em três etapas: conceitualização, formalização e simulação. Na última etapa foram efetuadas a avaliação, exploração e simulações de diferentes cenários divididos em dois grupos: a) cenários de referência ou tendenciais (BaU) no período de 2016 até 2070, elaborados sem incorporar alterações provocadas pelas mudanças climáticas globais (MCG); b) cenários em que foram incorporados os efeitos das MCG no nível médio da precipitação na BH do ALPA, o que permitiu a avaliação comparativa dos impactos. No modelo geral da Bacia Hidrográfica do Alto do Paranapanema (MGBALPA), foram gerados 10 submodelos divididos em três grupos principais: de demanda, de oferta e aqueles que realizam cálculos específicos para simular os diferentes elementos estudados. Para avaliar os resultados, foram utilizados os Índices de Falkenmark, Keller e o Índice de Sustentabilidade de Xu. Nos cenários *Business as Usual* (BaU) os três índices avaliados indicam que existe na BH do ALPA uma oferta adequada de água que permite satisfazer a demanda da população (Índice de Falkenmark). Quanto ao uso de água, o Índice de Keller mostra que dentro das fases de desenvolvimento, a bacia do ALPA está na Fase de Exploração, estágio I e II, usando até 60% da água disponível, sendo considerada uma bacia aberta. Por outro lado, segundo o Índice de Sustentabilidade, o sistema de recursos hídricos da bacia não apresenta situações de estresse ou vulnerabilidade. Os resultados do cenário combinado que incorpora variações nas precipitações, na taxa de crescimento das terras irrigadas e na vazão ecológica, mostram, de forma geral, uma deterioração nos três índices, indicando que essas variações combinadas afetam a disponibilidade de água para a população, tornando a bacia do ALPA um sistema fechado e indicando uma sobre- explotação da oferta de água disponível.

Palavras-chave: balanço hídrico; impactos climáticos; pensamento sistêmico; STELLA; gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

This research aimed to formulate a general model using System Dynamics methodology and STELLA software, composed of specific sub-models, to assess the impacts caused by global climate change, manifested in changes in rainfall, on irrigated agriculture and water resources in the Upper Paranapanema Watershed (ALPA Watershed), SP. The model development process was divided into three stages: conceptualization, formalization, and simulation. In this last stage, the evaluation, exploration, and simulations of different scenarios, divided into two groups, were performed. In group A, the reference or trend scenarios (BaU) in the period from 2016 to 2070 were elaborated without incorporating changes caused by global climate change (GCC) while in the scenarios of group B, the effects of GCC on the average level of precipitation in the ALPA B were incorporated, which allowed the comparative evaluation of the impacts. In the general model of the Upper Paranapanema Watershed (MGBALPA), 10 submodels were generated, divided into three main groups: demand, supply, and those that perform specific calculations to simulate the different elements studied. To evaluate the results, the Falkenmark, Keller, and Xu Sustainability Index were used. In the *Business as Usual* (BaU) scenarios, the three indices evaluated indicate that there is an adequate supply of water in the ALPA basin to satisfy the demand of the population (Falkenmark Index). As for water use, the Keller Index shows that within the development phases, the ALPA basin is in the Exploration Phase, stage I and II, using up to 60% of the available water, being considered an open basin. On the other hand, according to the Sustainability Index, the basin's water resources system does not present situations of stress or vulnerability. The results of the combined scenario that incorporates variations in precipitation, the growth rate of irrigated land, and the ecological flow show, in general, a deterioration in the three indices, indicating that these combined variations affect the availability of water for the population, making the ALPA basin a closed system and indicating an overexploitation of the available water supply.

Keywords: water balance; climate Impacts; systems thinking; STELLA; water resources management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 13

2 REVISÃO DE LITERATURA..... 16

2.1 Impactos das Mudanças Climáticas Globais..... 16

2.2 Modelos de Recursos Hídricos..... 18

2.3 Teoria de Sistemas..... 19

2.3.1 Dinâmica de Sistemas: Aspectos Metodológicos..... 20

2.3.1.1 Princípios e Ferramentas da Dinâmica de Sistemas..... 21

2.3.1.2 Etapas para a Construção de um Modelo de Dinâmica de Sistemas..... 22

3 MATERIAL E MÉTODOS..... 24

3.1 Caracterização da Região de Estudo..... 26

3.1.1 Aspectos Gerais da Bacia Hidrográfica do Alto do Paranapanema..... 26

3.1.1.1 Clima..... 31

3.1.1.2 Geomorfologia..... 31

3.1.1.3 Vegetação..... 32

3.1.1.4 Recursos Hídricos..... 33

3.1.1.5 Pedologia..... 34

3.1.1.6 Potencialidade Agrícola..... 35

3.2 Fonte de Informações e Dados..... 35

3.3 Etapas de Desenvolvimento do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (MGBALPA)..... 36

3.3.1 Etapa de Conceitualização..... 37

3.3.1.1 Diagrama de Influência ou Círculo de Causalidade..... 38

3.3.2 Etapa de Formalização..... 39

3.3.2.1 Descrição Matemática do Modelo..... 39

3.3.2.1.1 Estimativa da Oferta de Água..... 39

3.3.2.1.2 Estimativa das Águas Superficiais..... 39

3.3.2.1.3 Estimativa das Águas Freáticas 40

3.3.2.1.4 Estimativa das Águas de Reúso..... 40

3.3.2.2 Estimativa da Demanda de Água dos Setores Usuários..... 40
3.3.2.2.1 Estimativa da Demanda Agrícola de Água..... 41
3.3.2.2.2 Estimativa da Demanda de Água da População..... 42
3.3.2.2.3 Estimativa da Demanda de Água da Pecuária..... 43
3.3.2.2.4 Estimativa da Demanda Industrial de Água..... 43
3.3.2.2.5 Estimativa da Demanda Ambiental de Água..... 44
3.3.3 Etapa de Simulação..... 44
3.3.3.1 Índices usados para Avaliação do Sistema de Recursos Hídricos Na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema..... 45
3.4 Validação do Modelo..... 46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 48
4.1 Diagrama de Influência..... 48
4.2 Diagrama de Estoque e Fluxo..... 48
4.3 Apresentação e Descrição Estrutural do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema..... 50
4.4 Cenários do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema..... 53
4.4.1 Resultados Cenários BaU…..……..... 55
4.4.2 Resultados Cenários Mudanças climáticas……..... 67
5 CONCLUSÕES..... 77
REFERÊNCIAS..... 79
APÊNDICE A..... 86

1 INTRODUÇÃO

As variações do clima provocadas pelo aquecimento da Terra estão ocasionando problemas socioeconômicos e ambientais de grande relevância para o planeta de forma geral.

Os relatórios de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas-IPCC (2007, 2014, 2021) e muitas pesquisas científicas consideram que o clima da Terra está mudando e afirmam que essa mudança tem sido ocasionada pelas atividades humanas. As pesquisas e avaliações sobre mudança climática têm experimentado uma série de avanços que têm permitido a geração de modelos climáticos cada vez mais apurados.

Segundo diversos estudos do IPCC, especificamente os divulgados em 2014 e 2021, as variações na temperatura da terra podem oscilar entre 1,1°C e 6,4°C, com média de 4°C até o final do século XXI. Além do aumento na temperatura do ar, há previsão de mudanças no regime de chuvas, tanto em nível espacial como temporal.

No Brasil, o setor agrícola e o setor de recursos hídricos têm despertado grande atenção por serem os mais impactados pelas alterações no clima. Na abordagem sobre aspectos climáticos realizada por Cox *et al*. (2008), Marengo *et al*. (2008a, 2008b) e Marengo (2014), é notória a vulnerabilidade do Brasil à variabilidade climática.

A escassez do recurso hídrico, em quantidade e em qualidade, já é uma realidade em algumas regiões do país. No estado de São Paulo e em toda a região Sudeste, a mais recente escassez hídrica de 2013 e 2014 (MANSUR; ASSAD, 2015) trouxe consequências negativas ao serviço de abastecimento de água, à geração de energia nas hidrelétricas e à agricultura.

O setor agrícola brasileiro é muito diverso e ocupa um papel preponderante na economia. Segundo dados de 2021 (BRASIL, 2021), o setor aporta cerca de 27% do Produto Interno Bruto e gera aproximadamente 35% dos empregos. Existem cerca de 5 milhões de propriedades rurais, nas quais se produzem alimentos e fibras. Muitos desses produtos são exportados, fazendo com que o Brasil ocupe desde 2008, o quarto lugar mundial como exportador de produtos provenientes da agricultura, caracterizando o país como um importante provedor de alimentos a nível mundial (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS-FAO, 2021).

O setor agrícola é impactado diretamente pelas condições climáticas. Cerca de 80% das oscilações na produtividade do setor obedecem às variações nos fatores meteorológicos como: temperatura, radiação solar, chuva, umidade do ar, velocidade do vento e disponibilidade de água no solo, os outros 20% das alterações na produtividade dependem de aspectos sociais, econômicos, políticos e de infraestrutura (BRASIL, 2016).

As projeções do IPCC (2021) formuladas em diferentes cenários indicam que Brasil terá incrementos de temperatura e variações nas precipitações.

Nesse cenário de alterações climáticas, torna-se cada vez mais necessária a compreensão do impacto que tais modificações terão sobre o setor agrícola e sobre os recursos hídricos.

A demanda por pesquisas envolvendo os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade dos cultivos agrícolas e sobre os recursos hídricos em nível regional é crescente. Tais pesquisas são necessárias para fundamentar a tomada de decisões pelos diferentes atores afetados e para a formulação de políticas públicas que visem diminuir os impactos econômicos e ambientais adversos provocados pelas mudanças climáticas.

Esta pesquisa teve o objetivo de formular um modelo geral utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas (DS), composto por submodelos específicos para avaliar os impactos causados por mudanças climáticas globais (MCG), manifestadas em alterações na pluviosidade, sobre a agricultura irrigada e os recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (BH do ALPA), SP. Os objetivos específicos foram:

a) Desenvolver um processo de modelagem de Dinâmica de Sistemas aplicado aos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura irrigada e os recursos hídricos mediante a obtenção de modelos mentais e a construção de diagramas de influência, estoque e fluxos;

b) Elaborar e validar um modelo matemático representativo da oferta e demanda dos recursos hídricos para a BH do ALPA na plataforma STELLA 10.1.2;

c) Identificar os prováveis impactos na agricultura irrigada e nos recursos hídricos sob a perspectiva de diferentes cenários da mudança do clima na BH do ALPA, avaliando suas prováveis repercussões.

Portanto, o produto desta pesquisa é um quadro geral do futuro da agricultura irrigada e dos recursos hídricos na Bacia do Alto Paranapanema, consistente com as

premissas de mudanças do clima utilizadas pelo IPCC. Os cenários de referência ou tendenciais no período de 2016 até 2070 foram elaborados sem a consideração dos impactos causados por MCG (SMCG), enquanto nos cenários com as MCG (CMCG), foram incorporados os efeitos das MCG na agricultura e nos recursos hídricos, o que permitiu a avaliação comparativa dos impactos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Impactos das Mudanças Climáticas Globais

A disponibilidade de água no Brasil varia entre as bacias hidrográficas e depende em grande parte do clima, principalmente, de alterações associadas aos fenômenos *El Niño* e *La Niña* à variabilidade na temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical e Sul (MARENGO; DIAS, 2006; MARENGO, 2007; MARENGO *et al*., 2008 a, b) ou à Variabilidade Interanual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) do Atlântico (OLIVA, 2019).

Desde as décadas finais do século passado, as mudanças climáticas e seus impactos vêm ocupando a atenção de muitos cientistas, acadêmicos, políticos, meios de comunicação e população em geral.

Visando organizar e sistematizar as informações relativas às mudanças climáticas e estimular o intercâmbio de estudos entre diferentes partes do mundo, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram em 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*-IPCC).

O IPCC é formado por cientistas de diversos países que foram escolhidos pelos seus respectivos governos com o objetivo de discutir cientifica e periodicamente as mudanças no clima do planeta. Essas avaliações são publicadas na forma de Relatórios de Avaliação. Os cientistas se organizam em três grupos de trabalho: o Grupo 1 (WG1), que trata da base física das mudanças do clima, o Grupo 2 (WG2), que trata de impactos, vulnerabilidades e adaptação, e o Grupo 3 (WG3), que lida com a mitigação dos impactos das MCG. Já foram publicados cinco grandes Relatórios de Avaliação e uma série de relatórios especiais e outros documentos. Em 2021 começou a ser publicado o sexto relatório.

As avaliações científicas sobre a situação da mudança climática feitas pelo IPCC vêm apresentando evidências de como o planeta está sendo afetado, especialmente, com a ocorrência de eventos climáticos extremos que impactam de forma mais severa os países mais pobres localizados nas regiões tropicais (IPCC, 2021). Muitos destes países experimentam grandes variações no seu regime pluvial, nos aspectos quantitativo e qualitativo.

Segundo o Relatório Stern (2006), estudo patrocinado pelo governo Britânico, algumas das consequências previstas para os diferentes níveis de aumento da temperatura da Terra poderiam ser: o encolhimento das geleiras, o que seria uma ameaça para o suprimento de água para milhões de pessoas; redução na produção agrícola; morte de muitas pessoas por causa de malária, desnutrição e outras doenças relacionadas com as alterações climáticas; morte dos recifes de coral, em especial a Grande Barreira de Corais; milhões de pessoas expostas a enchentes nas regiões costeiras; extinção de espécies na região do Ártico, derretimento do gelo na Groenlândia e na Antártida, provocando o aumento no nível dos oceanos e afetando o sistema de circulação de águas quentes no Atlântico; possibilidade de desaparecimento de grandes geleiras no Himalaia e estiagem. A gravidade desses impactos dependerá do nível de elevação da temperatura do planeta.

O Brasil tem-se mostrado suscetível aos impactos das mudanças climáticas provocados por eventos extremos. Entre as regiões mais vulneráveis do país, têm-se a Amazônia e a região Nordeste, conforme relatado por Marengo (2007), Ambrizzi *et al*. (2007) e Marengo *et al*. (2007). Formular cenários prováveis sobre o comportamento de parâmetros climáticos e hidrológicos futuros pode ajudar na estimação da oferta e demanda de água e também na definição da disponibilidade dos recursos hídricos para a agricultura irrigada, permitindo a elaboração de políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

De acordo com o IPCC (2014, 2021), a mudança climática tem provocado grandes danos à natureza e às pessoas. O aumento e a frequência de eventos extremos têm causado grandes prejuízos, muitos deles difíceis de reverter. Os ecossistemas apresentam perdas de espécies causadas por aumentos nas temperaturas. Da mesma forma em muitos países da África, América Latina e Asia verifica-se falta de água e alimentos, desnutrição, problemas de saúde, perdas na produtividade agrícola, incêndios florestais, migrações e deslocamento de pessoas. Segundo o IPCC (2021), cerca de 3,6 bilhões de pessoas vivem em locais altamente vulneráveis à mudança do clima. Entre 2010 e 2020, a mortalidade causada por enchentes, secas e tempestades foi 15 vezes maior nas regiões mais vulneráveis do que nas menos vulneráveis.

Nos diferentes relatórios de avaliação, o IPCC identificou cinco aspectos que devem ser estudados e monitorados: a) riscos a sistemas únicos; b) aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos; c) desigualdade nos

impactos; d) custo dos impactos; e e) o risco de mudanças abruptas nos ecossistemas. O último relatório publicado pelo IPCC em 2021 sinaliza que os níveis de risco para todos esses aspectos ficaram altos ou muito altos em patamares de aquecimento ainda menores do que aqueles previstos em 2013/2014, indicando que a situação está ficando mais complexa e difícil de gerir.

O sexto relatório (IPCC 2021) indica que, se a temperatura continuar aumentando, há o risco de diminuição da água disponível para irrigação e redução da quantidade de água para agricultura de sequeiro, geração de energia e consumo humano devido ao encolhimento da massa global de geleiras de montanha, enquanto nas áreas insulares os aquíferos podem ser salinizados por intrusão marinha.

É importante lembrar que os fatores climáticos interagem entre si e com fatores não-climáticos, produzindo perdas severas e muitas vezes irreversíveis de serviços ecossistêmicos e biodiversidade.

2.2 Modelos de Recursos Hídricos

Devido à complexidade, as análises dos recursos hídricos requerem abordagem multidisciplinar, envolvendo profissionais de diferentes especialidades com o objetivo de fornecer informações que possibilitem abordar de forma clara e sistemática a problemática da água.

Desde a década de 1990, vem-se fazendo estudos para conhecer a disponibilidade e os usos múltiplos dos recursos hídricos a nível global, o que possibilita fazer projeções futuras sobre a oferta destes.

Alguns estudos de referência nessa temática foram efetuados por Gleick (1993; 1998; 2000) e Shiklomanov (1997). Usando dados das vazões dos rios, os estudos citados apresentaram estimativas de caráter quantitativo dos recursos hídricos disponíveis. Para definir os usos múltiplos da água, foram utilizados alguns parâmetros como: nível de desenvolvimento social e econômico, dados demográficos, aspectos geográficos e climáticos, entre outros.

No entanto, de acordo com Simonovic (2002), é importante destacar que predizer o balanço hídrico e os usos futuros da água é uma tarefa difícil, sujeita a erros e incertezas.

Têm-se também elaborado alguns modelos voltados à gestão dos recursos hídricos que incorporam a interação entre os fatores quantitativos e os diferentes usos da água de forma dinâmica, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes: PODIUM-*Policy Dialogue Model* (EHRMANN, 1997); IMPACT-*International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade* (ROBINSON *et al.*, 2015); PoleStar (STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE-SEI, 2022a); WEAP- *Water Evaluation and Planning* (SEI, 2022b); WaterGAP-*Global Assessment and Prognosis* (SCHMIED *et al.*, 2021), e o modelo TARGETS-*Tool to Assess Regional and Global Environmental and Health Targets for Sustainability* (ROTMANS; VRIES, 1997). Esses modelos consideram diferentes aspectos da problemática da água, com foco nas interações dinâmicas entre as variáveis físicas que determinam a oferta de água disponível e as variáveis que determinam a demanda dos diferentes usuários dos recursos hídricos (SIMONOVIC, 2002).

Os estudos de Forrester (1961; 1971) publicados no livro *World Dynamics;* e nos livros *Beyond the Limits* de Meadows, Meadows e Randers (1992); *Dynamics of growth in a finite world* de Meadows *et al.* (1974) e em Simonovic e Fahmy (1999) e Simonovic, Fahmy e El-Shorbagy (1997), embasados na metodologia Dinâmica de Sistemas, despertaram grande interesse para a modelagem sistêmica na comunidade científica internacional e tomadores de decisão a nível global e regional. Tal modelagem permite analisar e avaliar possíveis consequências futuras considerando as condições de desenvolvimento atuais.

Nos estudos anteriores, os recursos hídricos foram analisados de forma pouco profunda por tratar-se de modelos muito gerais sobre o funcionamento e dinâmica dos grandes sistemas terrestres. Todavia, esses estudos foram muito importantes para o desenvolvimento da Dinâmica de Sistemas na modelagem de sistemas complexos como é o caso dos recursos hídricos, pois a maioria das análises tradicionais sobre o balanço hídrico não refletem a interação dinâmica dos parâmetros incorporados nos modelos, gerando limitadas projeções sobre o comportamento futuro dos sistemas.

2.3 Teoria de Sistemas

O referencial teórico no qual se embasa esta pesquisa é a Teoria de Sistemas. A abordagem sistêmica da realidade se foca em analisar quais são as estruturas fundamentais que determinam os diferentes sistemas. Como disciplina de estudo está interessada em visualizar as problemáticas desde uma perspectiva holística, procurando observar as interações que se dão entre os elementos que conformam os sistemas. A ênfase desta Teoria está orientada a determinar padrões de comportamento para visualizar a dinâmica que o sistema em estudo apresenta e que é produto de sua estrutura.

Para Senge (1997), o pensamento sistêmico é um marco conceitual em que certas metodologias como a Dinâmica de Sistemas e ferramentas como os diagramas de influência, arquétipos e modelos permitem determinar como se comporta um sistema. Uma vez determinado esse comportamento, é factível fazer alterações para melhorar o desempenho do mesmo.

2.3.1 Dinâmica de Sistemas: Aspectos Metodológicos

Devido às limitações humanas para avaliar sistemas de grande complexidade, Senge (1990) propôs o uso do pensamento sistêmico para a análise de tais problemáticas.

Para analisar os problemas da realidade, a teoria de sistemas utiliza como ponto de partida os modelos mentais que se constroem em relação aos objetos de estudo.

Os modelos mentais compreendem o que se sabe sobre o funcionamento dos sistemas. Contudo, a capacidade humana de análise pode chegar até certo ponto, dadas as limitações que têm, razão pela qual deve-se fazer uso de ferramentas computacionais que auxiliem nesta tarefa. Empregando a Dinâmica de Sistemas, pode-se transformar os modelos mentais em estruturas computacionais, utilizando certos *softwares* que operam de acordo com princípios dessa metodologia.

O enfoque da DS procura entender como interagem as diferentes variáveis que conformam os sistemas, e como essa interação define um comportamento dinâmico ao longo do tempo, que pode ser crescente, decrescente ou exponencial, por exemplo. Uma vez determinada a dinâmica do sistema, é possível tomar decisões sobre como melhorar seu desempenho.

O processo de modelagem se torna muito útil para o entendimento humano do funcionamento complexo da natureza e das dinâmicas que a caracterizam.

Os modelos, de acordo com a classificação de Neelamkavil (1987), podem ser físicos, simbólicos ou mentais.

2.3.1.1 Princípios e Ferramentas da Dinâmica de Sistemas

Segundo Richardson (1991), três caraterísticas principais fundamentam a metodologia da DS: retroalimentação entre variáveis, não linearidade e o *delay* ou atraso nas relações entre as variáveis.

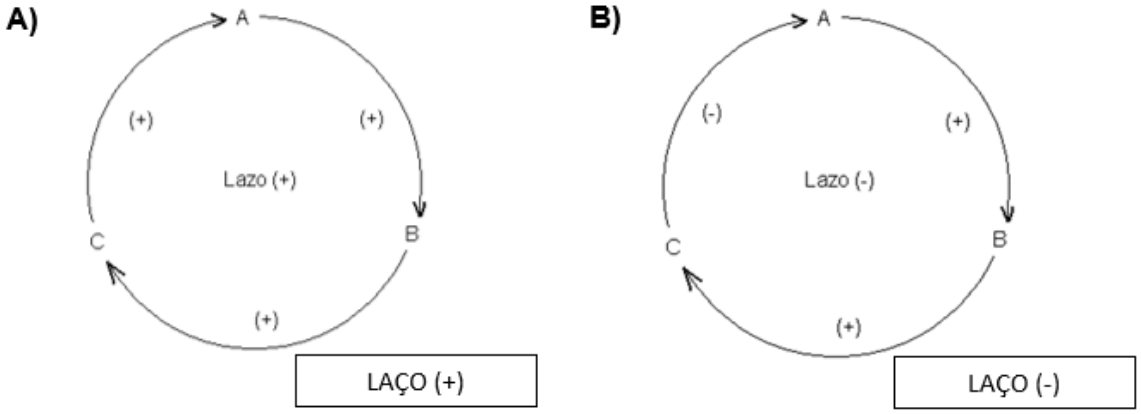
Nos sistemas abertos, os resultados não incidem nas variáveis que os geram, enquanto nos sistemas fechados, os resultados voltam a incidir sobre as variáveis que os produziram, existindo a chamada retroalimentação.

As interações entre as variáveis formam círculos fechados de relações causa-efeito, representados por *loops* ou laços de retroalimentação. Cada modelo pode ser conformado por vários *loops*, que por sua vez fazem interações entre si, o que não se visualiza nas relações lineares entre variáveis.

Os *loops* podem expressar uma retroalimentação positiva (também chamada de reforço) ou negativa (também denominada de balanço).

Como mostra a Figura 1A, os *loops* que geram retroalimentação positiva (+), indicam que a mudança em uma variável é transmitida através do *loop*, reforçando a mudança inicial, o que provoca crescimento nesse sistema. Por outra parte, os *loops* em que a retroalimentação é negativa (-) (Figura 1B), a mudança que se dá em uma variável e que se transmite através do *loop*, se contrapõe à mudança inicial, procurando que se gere estabilidade no sistema.

Figura 1 – *Loops* ou laços de retroalimentação: A) positiva e (B) negativa



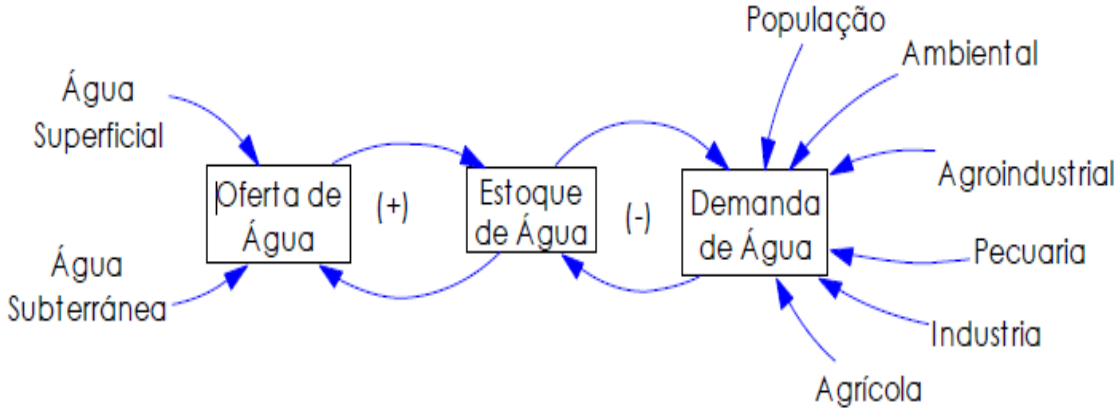
Fonte: Senge (1995)

A DS avalia de forma holística a relação entre os elementos ou variáveis que conformam um sistema, diferentemente da visão linear, que avalia especificamente a relação causa-efeito entre as variáveis sem considerar as interações entre elas.

Outra caraterística da DS é a existência de *delays* ou atrasos de materiais e/ou informação nos sistemas dinâmicos, provocando atrasos nos efeitos que as decisões feitas anteriormente possam provocar no funcionamento dos sistemas. Segundo Forrester (1961), isso dificulta visualizar as relações causa-efeito, pois muitas vezes esses efeitos aparecem distantes no tempo e no espaço da causa original.

Os diagramas de influência são uma das principais ferramentas usadas na elaboração de modelos de simulação. Representam a interação e retroalimentação entre os elementos chave que caracterizam e geram a dinâmica de um sistema. São representações gráficas dos principais *loops* de relações causais que conformam a estrutura de um sistema, como mostra a Figura 2, que exemplifica o diagrama de influência da estrutura do sistema de recursos hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (SÁNCHEZ-ROMÁN; FOLEGATTI; ORELLANA-GONZÁLEZ, 2010).

Figura 2 – Diagrama causal do sistema de recursos hídricos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí



Fonte: Sánchez-Román, Folegatti e Orellana-González (2010).

2.3.1.2 Etapas para a Construção de um Modelo de Dinâmica de Sistemas

O desenvolvimento de um modelo de simulação de DS é feito por meio de diferentes etapas. Segundo Ford (1999), essas etapas podem ser divididas em oito processos, iniciando com a identificação clara e precisa da problemática estudada, continuando com a determinação de variáveis chave, elaboração dos diagramas de influência, diagramas de estoque e fluxo e processos de simulação e exploração, até finalizar com análises de sensibilidade.

Já Forrester (1961) indica que o processo de desenvolvimento de um modelo de simulação deve ser dividido em seis etapas, iniciando da mesma forma sugerida por Ford (1999), com a identificação do problema estudado e as perguntas que deverão ser respondidas para assim, determinar as variáveis essenciais que caracterizam o sistema a modelar, terminando com a verificação do modelo e a experimentação.

O desenvolvimento de um modelo de simulação é um processo criativo e de abstração, produto de uma pesquisa ampla e, necessariamente, multidisciplinar. A modelagem é um processo permanente de aprendizado e análise, baseada em princípios e procedimentos, os quais cada pesquisador molda as relações existentes no sistema que deseja simular para alcançar certos objetivos (STELLA, 2001).

As variáveis utilizadas pelo *software* são de três tipos: estoques, que representam as acumulações ou níveis que atingem um sistema; os fluxos, que mostram as atividades que enchem ou esvaziam os estoques, determinadas pelas taxas respectivas de fluxo; e as variáveis auxiliares ou de conversão, simbolizadas por círculos, que permitem efetuar diferentes cálculos. Todas essas variáveis são relacionadas por meio de conectores, representados por setas, que evidenciam as relações estruturais de causa-efeito dos modelos (STELLA, 2001).

De acordo com os estudos de Forrester (1980), todo sistema pode ser representado por estoques e fluxos. O comportamento do sistema é representado nos estoques e os fluxos o conduzem a seu estado futuro.

O *software* é um laboratório em que é possível avaliar processos reais, fornecendo subsídios para a tomada de decisões (DUVOISIN, 2000), sendo muito utilizado em estudos de DS que tratam da modelagem de sistemas complexos que incorporam diferentes tipos de variáveis: físicas, sociais e econômicas, por exemplo.

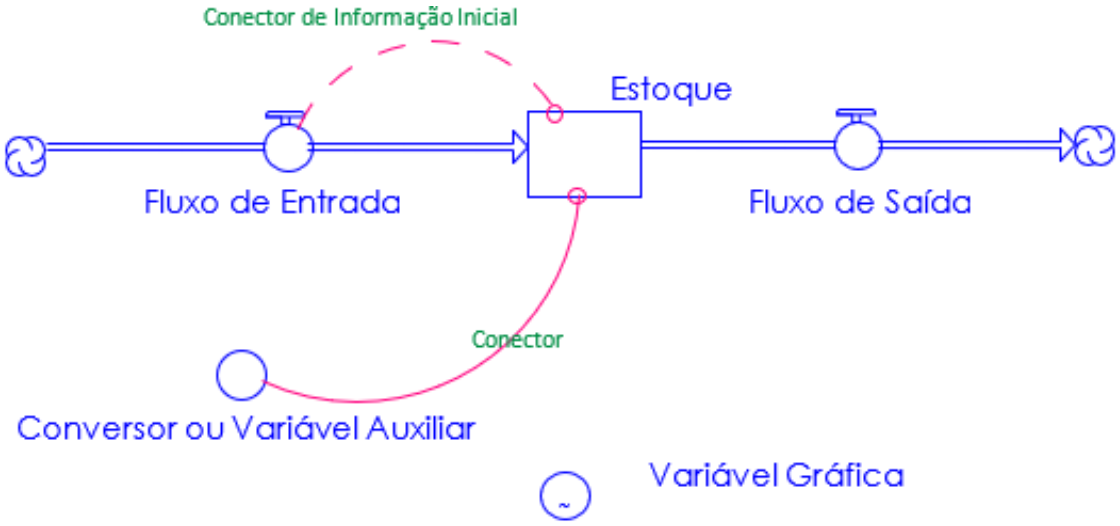
3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta pesquisa o modelo utilizado foi um modelo simbólico de tipo matemático e dinâmico. O processo de desenvolvimento do modelo de simulação para avaliar os impactos da mudança climática na BH do ALPA, objeto desta pesquisa, foi dividido em três etapas: conceitualização, formalização e avaliação e exploração, nessa última etapa, foram efetuadas as simulações dos diferentes cenários.

Na etapa de conceitualização, foi formulado o diagrama de influência, que representa a estrutura do sistema modelado e que é o processo inicial para a construção do modelo de simulação dinâmica.

A etapa de formalização consistiu em transformar o diagrama de influência, definido na etapa anterior, em um diagrama de estoque e fluxos, utilizando o *software* Stella 10.1.2 para o ambiente *Windows.* O Stella: "*Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*", é um *software* que permite o desenvolvimento de modelos de simulação dinâmica com o uso de ícones ou símbolos por meio dos quais é possível desenhar estruturas ou diagramas que representam de forma matemática a problemática em estudo. A Figura 3 mostra os ícones utilizados pelo Stella para simbolizar as variáveis contidas nos modelos.

Figura 3 – Símbolos utilizados pelo *software* STELLA na representação de um estoque; fluxos de entrada e de saída; conector de informação inicial; conector; conversor ou variável auxiliar e variável gráfica



Fonte: STELLA (2001).

O foco da modelagem foi o desenvolvimento de um modelo geral da BH do ALPA (MGBALPA) embasado na metodologia da Dinâmica de Sistemas. O modelo geral compreendeu submodelos de oferta de recursos hídricos e as demandas dos setores econômicos mais importantes: agrícola, pecuária, industrial, população, e demanda ambiental. Essas variáveis foram integradas à variação das precipitações na região em estudo, visando determinar o impacto dessa importante variável climática no balanço hídrico da região em estudo.

O modelo geral desenvolvido para a BH do ALPA compreendeu três níveis ou submodelos:

a) Nível Atmosférico: neste nível foi considerada e simulada a variável de precipitação a fim de determinar seu comportamento ao longo do tempo.

b) Nível de Superfície: neste nível foram modelados os processos a seguir:

- Demandas de água por setores econômicos na BH do ALPA: ambiental, agrícola, industrial, pública e doméstica;
- Oferta de água superficial.

c) Nível Subterrâneo: correspondeu à oferta e demanda de água freática.

Esta pesquisa procurou efetuar uma síntese sistêmica em termos de impactos das MCG em trajetórias temporais explícitas para o setor de recursos hídricos e para o setor agrícola (maior consumidor de água) na BH do ALPA. Os submodelos formaram parte de um modelo geral, procurando-se garantir a consistência intertemporal dos resultados em seus vários níveis de agregação.

Em termos metodológicos, as projeções de alterações climáticas se articularam a modelos de oferta e demanda de recursos hídricos, de forma que uma análise integrada dos impactos desses fenômenos pudesse ser efetuada.

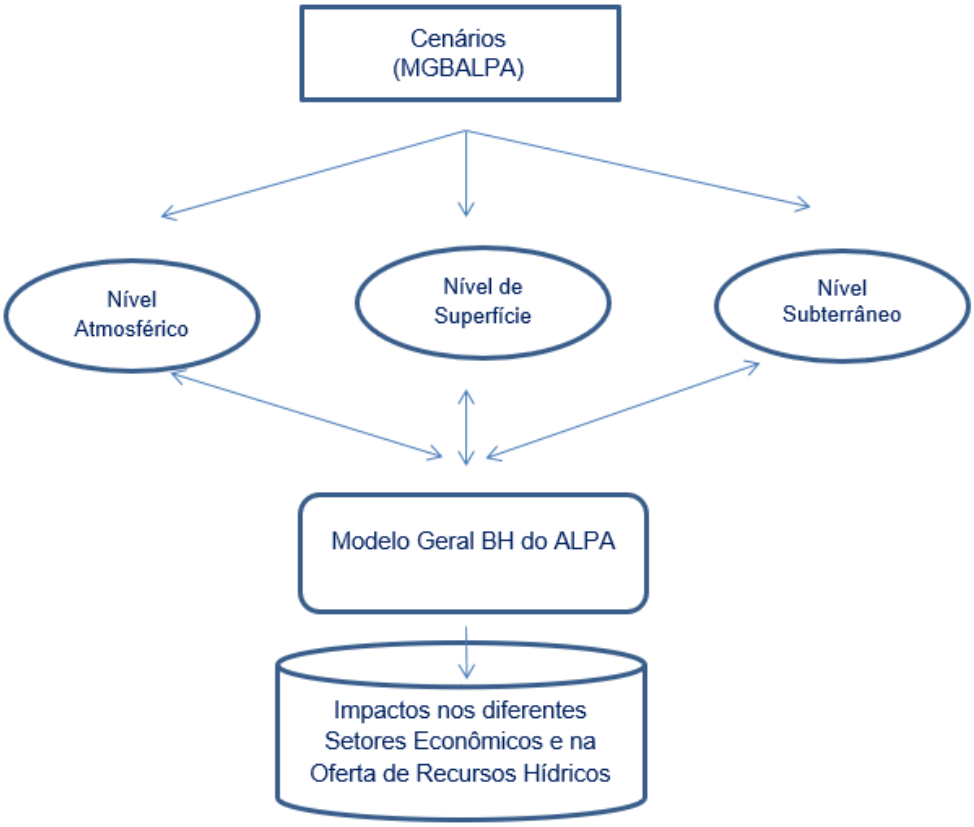
É importante enfatizar que os cenários delineados tinham como ponto de partida, as trajetórias climáticas do IPCC, que se baseiam em hipóteses sobre o comportamento futuro do clima. Este estudo simulou o comportamento futuro da agricultura irrigada e do setor de recursos hídricos na BH do ALPA em compatibilidade com as hipóteses dos cenários A2 e B2 do IPCC de 2014. Simplificando, o cenário A2 antecipou que deveria existir pouca ansiedade com as mudanças climáticas, podendo ser caracterizado como tendencial, ou seja, o chamado “B*usiness as Usual*”; enquanto o cenário B2 colocou uma maior preocupação das sociedades nos problemas climáticos, o que se traduziu em

alterações de costumes e comportamentos com respeito à sustentabilidade ambiental.

Foram gerados dois grupos de cenários: com e sem variações do clima, nos quais foram feitas simulações. Tais cenários apresentam trajetórias futuras das demandas dos diferentes setores e a oferta de recursos hídricos na BH do ALPA vinculadas principalmente às variações nas precipitações.

A Figura 4 destaca os principais canais de integração entre os cenários de mudanças climáticas e o modelo geral.

Figura 4 – Modelagem dos impactos das mudanças climáticas globais sobre os diferentes setores econômicos e sobre a oferta de hídricos na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema



Legenda:BH do ALPA=Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema; MGBALPA= Modelo geral da Bacia Hidrográfica do Alto do Paranapanema.
Fonte: Resultados da investigação.

3.1 Caracterização da Região de Estudo

3.1.1 Aspectos Gerais da Bacia Hidrográfica do Alto do Paranapanema

Este estudo tomou por base a Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, definida como Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 14 (Figura 5), que está localizada na região Sudoeste do estado de São Paulo entre as coordenadas 23°00’ e 24°23’ Sul e 49°42’ e 47°22’ Oeste. Ao Norte, limita-se com a UGRI 17- Médio Paranapanema, ao Sul com a UGRI 11- Vale do Ribeira/ Litoral Sul, ao Leste com a UGRI 10- Sorocaba/Médio Tietê e ao Oeste com a região nordeste do estado do Paraná (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA – CBH-ALPA, 2020).

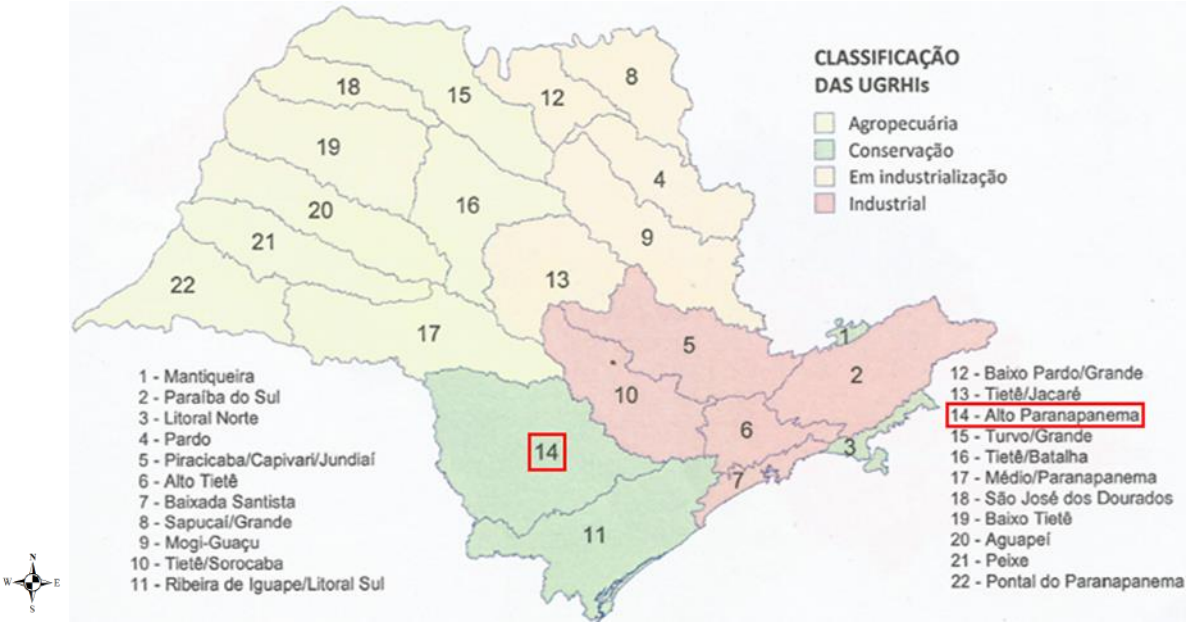
.

Figura 5 – Mapa de localização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14, Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, SP.

Fonte: Centro Tecnológico da Fundação Paulista (2015).

A UGRHI 14 é a maior do estado de São Paulo (Figura 6), apresentando 22.734,46 km² de área territorial e 22.689 km² de área de drenagem. Inclui sedes de 34 (trinta e quatro) municípios e 14 (quatorze) sub-bacias, como pode ser observado no Quadro 1. Tem uma população total de 744.429 habitantes, desses, 131. 038 moram na área rural (CBH-ALPA, 2020).

Figura 6 – Localização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14, Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, no estado de São Paulo



Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado De São Paulo-IPT (2011).

Quadro 1 – Sub-bacias e municípios da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

(continua)

Nº	Sub-bacia	Área (km²)	Municípios
1	Alto Itapetininga	1182,6	Itapetininga, Piedade, Pilar do Sul, São Miguel Arcanjo, Sarapuí e Tapiraí
2	Rios Guareí/Jacú/Santo Inácio/Paranapanema	2666,3	Angatuba, Bofete, Guareí, Itatinga, Paranapanema, Pardinho
3	Baixo Itapetininga	1419,9	Angatuba, Campina do Monte Alegre, Guareí, Itapetininga, São Miguel Arcanjo
4	Rio Turvo / Paranapanema Superior	3355,7	Angatuba, Buri, Campina do Monte Alegre, Capão Bonito, Itapetininga, Ribeirão Grande, São Miguel Arcanjo
5	Baixo Apiaí-Guaçú	891,3	Buri, Itapeva, Paranapanema
6	Rio Apiaí-Mirim	826,1	Apiaí, Buri, Capão Bonito, Guapiara, Itapeva, Taquarivaí
7	Alto Apiaí-Guaçú	1127,5	Apiaí, Buri, Itapeva, Ribeirão Branco, Taquarivaí
8	Ribeirão das Posses/ Rio Paranapanema	1958,1	Arandu, Avaré, Cerqueira César, Itaí, Itatinga, Paranapanema, Piraju

Quadro 1 – Sub-bacias e municípios da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

(continuação)

Nº	Sub-bacia	Área (km²)	Municípios
9	Baixo Taquari	1990,8	Coronel Macedo, Itaberá, Itaí, Itapeva, Paranapanema, Piraju, Taquarituba, Tejupá
10	Alto Taquari	2499,4	Apiaí, Bom Sucesso de Itararé, Itaberá, Itapeva, Nova Campina, Ribeirão Branco
11	Rio Paranapanema Inferior	1421,8	Bernardino de Campos, Cerqueira César, Chavantes, Ipaussu, Manduri, Óleo, Piraju, Sarutaiá, Tejupá, Timburi
12	Baixo Itararé	872,9	Coronel Macedo, Fartura, Itaporanga, Taguaí, Timburi
13	Rio Verde	1687,0	Barão de Antonina, Coronel Macedo, Itaberá, Itapeva, Itaporanga, Itararé, Riversul
14	Alto Itararé	825,2	Barão de Antonina, Bom Sucesso de Itararé, Itaporanga, Itararé, Riversul
Área total		22.734,46 km^2	

Fonte: SIGRH (2014) apud Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema-CBH-ALPA (2016).

Em 2016, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) constatou que a região do Alto Paranapanema concentra uma das mais importantes áreas de irrigação por pivô central, principalmente, nos municípios de Itaí, Paranapanema, Itapeva, Itaberá e Buri. No Quadro 2 tem-se a área irrigada pelo método de irrigação pivô central na UGRHI 14.

Quadro 2 – Municípios com irrigação por pivô central

(continua)

Nº	Município	Quantidade de formas associadas à irrigação por pivô central	Área irrigada por pivô central		Área do município na UGRHI 14 (km^2)	Proporção de área do município irrigada por pivô central (%)
			km²	%		
1	Angatuba	27	14	4	1040,05	1,34
2	Arandu	3	1	0	295,15	0,51
3	Avaré	4	3	1	490,08	0,56
4	Bernardino de Campos	17	11	3	142,98	7,95
5	Buri	42	24	6	1196,81	2,03
6	Campina do Monte Alegre	6	5	1	183,63	2,58
7	Capão Bonito	4	2	1	1651,16	0,13

Quadro 2 – Municípios com irrigação por pivô central

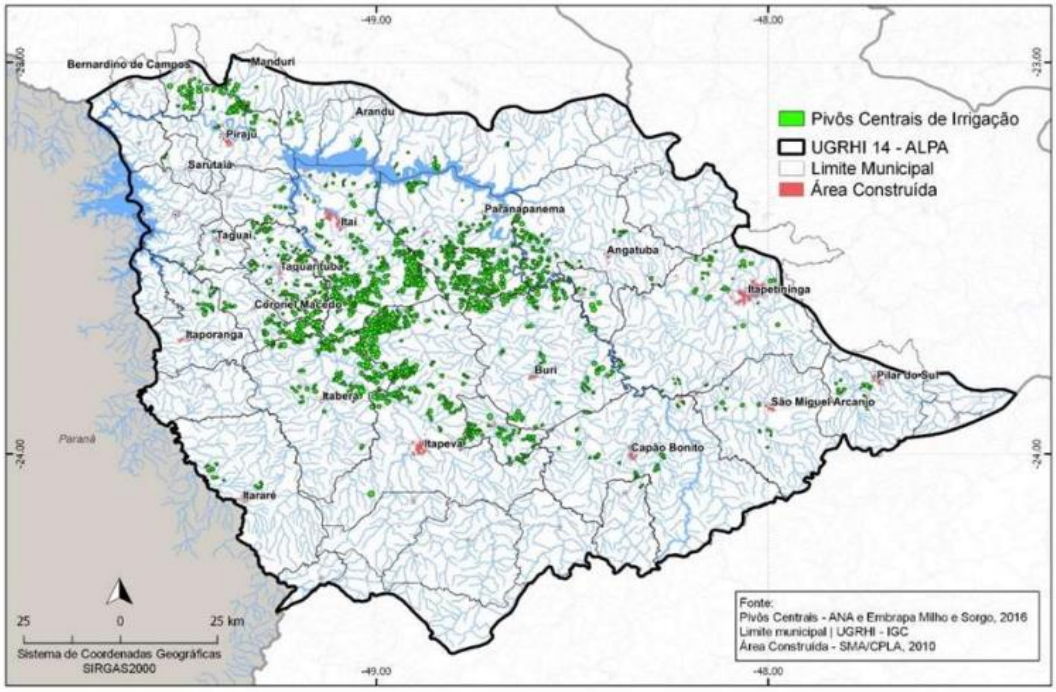
(continuação)

Nº	Município	Quantidade de formas associadas à irrigação por pivô central	Área irrigada por pivô central		Área do município na UGRHI 14 (km^2)	Proporção de área do município irrigada por pivô central (%)
			km²	%		
8	Cerqueira César	2	2	0	272	0,56
9	Coronel Macedo	6	5	1	301,6	1,52
10	Itaberá	34	27	7	1092,80	2,51
11	Itaí	137	85	22	1104,57	7,68
12	Itapetininga	30	17	4	1570,94	1,06
13	Itapeva	93	61	15	1828,47	3,31
14	Itaporanga	7	2	0	500,46	0,36
15	Itararé	7	4	1	1007,18	0,36
16	Itatinga	5	1	0	610,77	0,1
17	Manduri	11	8	2	177,76	4,24
18	Óleo	1	1	0	26,28	2,29
19	Paranapanema	116	63	16	1018,13	6,23
20	Pilar do Sul	8	4	1	626,56	0,71
21	Piraju	27	14	4	504,07	2,78
22	São Miguel Arcanjo	8	3	1	920,88	0,38
23	Taguaí	2	1	0	147,41	0,49
24	Taquarituba	33	14	4	451,68	3,13
25	Taquarivaí	50	23	6	235,11	9,87
	Total	680	394	100	17396,53	2,26

Fonte: IPT (2011) apud CBH-ALPA (2016)

A agricultura é apontada como uma das principais atividades econômicas da UGRHI 14 (CBH-ALPA, 2020). Destacam-se como culturas principais: milho, feijão, batata, soja e cana-de-açúcar. Outras atividades econômicas de interesse são a pecuária, focada na suinocultura e avicultura e a indústria, tendo o município de Itapetininga como polo econômico mais significativo. Na Figura 7 tem-se o destaque das áreas mapeadas que utilizam irrigação por pivôs centrais.

Figura 7 – Localização de pivôs centrais na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14, Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema-ALPA, no estado de São Paulo



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2016).

3.1.1.1 Clima

O clima da UGRHI, BH-ALPA, segundo dados do Comitê de Bacia do Alto Paranapanema-CBH – ALPA (2020)**,** é tropical úmido representado por Cwa, segundo a classificação climática de Köppen, com ligeira variação entre as regiões do interior e a serra de Paranapiacaba, com precipitação média anual em torno de 1.200 mm. Nas sub-bacias do Alto Itapetininga, Rio das Almas e Rio Turvo/Alto Paranapanema se apresentam as maiores precipitações chegando a precipitação média a 1.800 mm ano^{-1}. O período chuvoso ocorre principalmente de setembro a março, sendo janeiro o mês mais úmido, seguido por fevereiro e março, e o mês mais seco é agosto.

3.1.1.2 Geomorfologia

Duas unidades morfoestruturais distintas se destacam na área de interesse, que são: o Cinturão Orogênico do Atlântico (Planalto Atlântico, mais precisamente o

Planalto de Guapiara) e a Bacia Sedimentar do Paraná (Depressão do Paranapanema, Planalto Centro Ocidental e Planalto Residual de Botucatu) (CBH-ALPA, 2020).

As formas de relevo predominantes no Planalto de Guapiara são morros baixos com formato convexos, em altitudes variando entre 700 e 800 m com declividades predominantes entre 20 e 30%. Essas estruturas orográficas se associam geologicamente com filitos, granitos e calcários. Este planalto é caracterizado por vales entalhados com densidade de drenagem média a alta; o seu padrão dendrítico gera potencialmente um nível de fragilidade médio a alto (CBH-ALPA, 2020).

No limite superior da área da UGRHI 14 existe uma faixa em contato com a Depressão Periférica, denominada Planalto Residual de Botucatu. Nela predominam formas de relevo nuas, o que se transforma num relevo de cuestas, recortando o pacote basalto-arenítico (CBH-ALPA, 2020).

A Depressão Periférica Paulista, está representada na área de interesse pela Depressão Paranapanema. Essa unidade morfológica encontra-se encaixada ao leste/sudeste entre terrenos pré-cambrianos, e ao norte pela grande escarpa arenito-basáltica formada por sedimentos paleo-mesozóicos (CBH-ALPA, 2020).

Com vales entalhados e densidade de drenagem média a alta, os terrenos arenosos que conformam as formações Pirambóia e Botucatu, conformam a chamada Depressão Paranapanema; área vulnerável a fortes atividades erosivas (CBH-ALPA, 2020).

Na Bacia Sedimentar se encontram escarpas estruturais, escarpas erosivas; estas se caracterizam por vales entalhados com densidade de drenagem média a alta; sendo que sua fragilidade potencial a atividades erosivas é de média a alta (CBH-ALPA, 2020).

A Depressão Paranapanema tem vales entalhados, densidade de drenagem de média a alta que em áreas com solos arenosos se torna vulnerável a forte erosão. Os cursos d'água aqui são todos tributários do Rio Paranapanema, com padrão de drenagem tipo paralelo (CBH-ALPA, 2020).

3.1.1.3 Vegetação

A BH do Alto Paranapanema tem importantes áreas de preservação do meio ambiente, unidades de conservação e contém as nascentes do Rio Paranapanema.

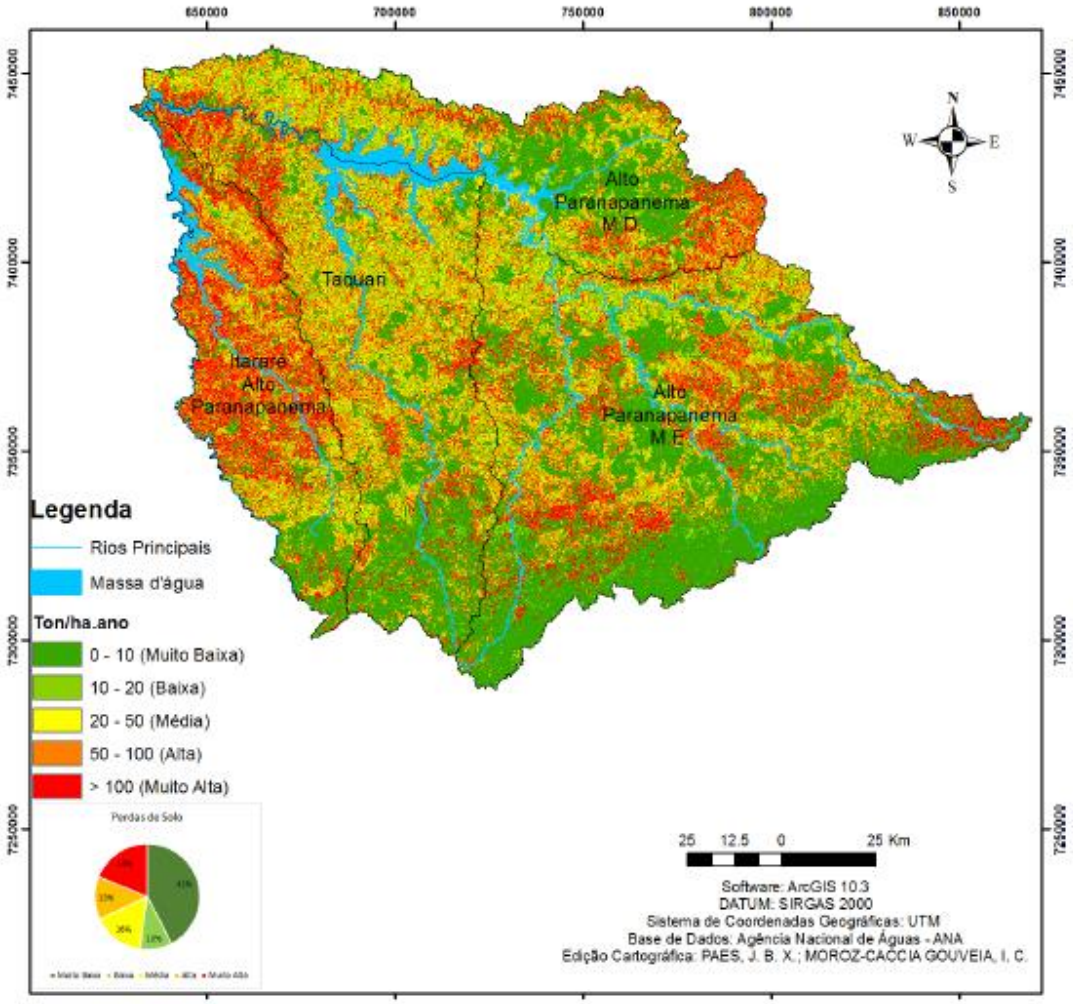
São 19 unidades de conservação, dentre as quais quatro unidades de proteção ambiental de nível estadual, além de várias estações ecológicas e florestas. As unidades de conservação somam aproximadamente 3.210 km^2 ou 321.000 ha (CBH-ALPA, 2020)

3.1.1.4 Recursos Hídricos

As principais finalidades do uso da água na UGRHI são para o abastecimento público, industrial e irrigação agrícola (CBH-ALPA, 2020).

A Figura 8 mostra os principais rios da Bacia que são: Alto Paranapanema, Taquarí e Itararé.

Figura 8 – Localização de Corpos Hídricos na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14, Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema-ALPA, no estado de São Paulo



Fonte: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (2018).

3.1.1.5 Pedologia

Segundo o Plano de Bacia do ALPA (2016-2027) disponibilizado pelo CBH-ALPA (2017, p. 65), na área de interesse são encontrados os seguintes tipos de solos:

a) Solos com B textural: são solos que apresentam os horizontes A, B e C em sequência, com o horizonte B comumente apresentando espessuras na faixa de 0,70 a 1,2 m, podendo também a espessura oscilar entre 0,40 e 3,0 m, nesse horizonte o teor de argila é maior que no horizonte A. Essa categoria de solo apresenta fração de argila superior a 15%, tem boa drenagem, baixa porosidade por ser mais argilosa, estrutura angular ou em bloco subangular e não sofre influência de processos de salinização.

b) Solos com B latossólico: quando apresentam perfil completo (A, B e C), essa categoria de solo apresenta faixa de troca entre os horizontes A e B usualmente gradual ou difusa, enquanto na mudança do horizonte B para o C, a faixa de transição é clara ou gradual e difusa. O horizonte B tem espessuras que oscilam entre 0,40 e 10 m, sendo mais usual espessuras variando de 1,5 a 4,0 m. São solos que normalmente apresentam estrutura pequena granular ou muito pequena granular, com fração de argila maior que 15%.

c) Solos Hidromórficos: caracterizados por serem solos de áreas de várzea, comumente apresentam relevo pouco profundo ou plano. São facilmente encharcáveis, com acumulação de matéria orgânica especificamente na primeira camada, apresentando como fenômeno a redução de matéria orgânica nas camadas subjacentes. Podem apresentar os horizontes A, C, G em sequência ou A, G bem como o horizonte BG ou Bg.

d) Solos pouco Desenvolvidos: são solos azonais, caracterizados principalmente pelo desenvolvido principiante do perfil. Apresentam os horizontes com sequência AD ou AC, não possuindo usualmente o horizonte B, quando esse horizonte está presente, o mesmo apresenta pouco desenvolvimento, tendo espessura inferior a 0,10 m. Para espessuras superiores a 0,10 m, apresenta percentual de argila menor que 15%.

3.1.1.6 Potencialidade Agrícola

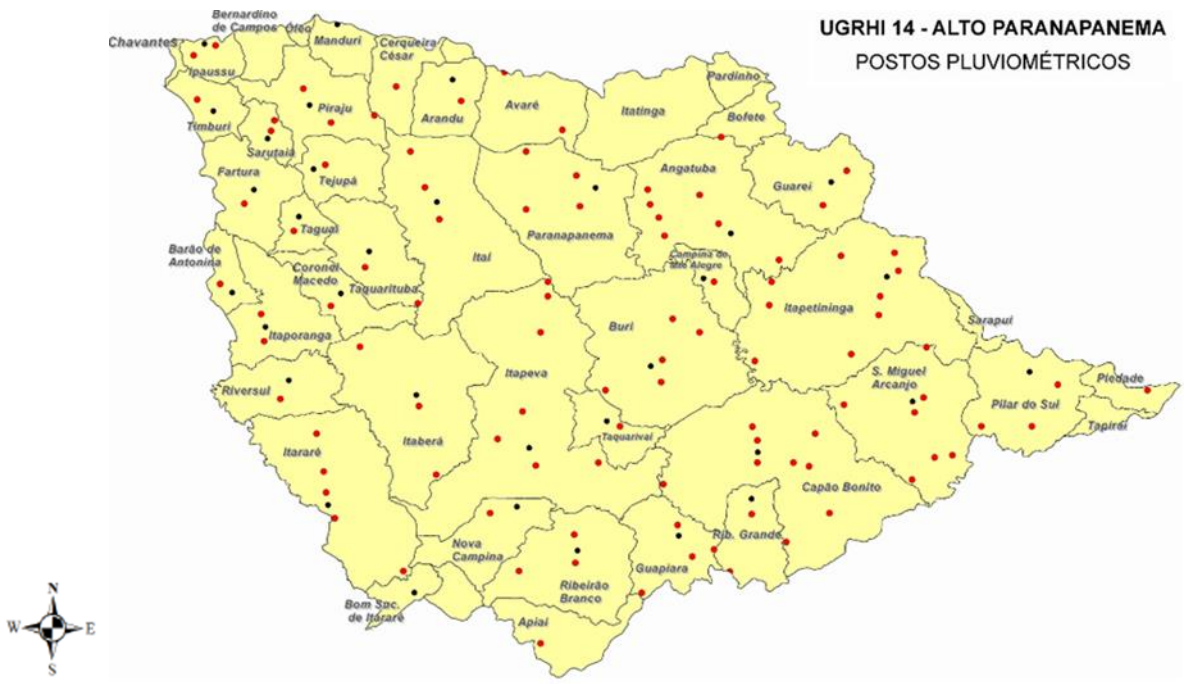
Na área da Bacia do ALPA, os solos caracterizados como Terra Roxa Legítima e Terra Roxa Estruturada, segundo o levantamento de reconhecimento dos solos do estado de São Paulo presente no Boletim Nº12 do Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas (1960), são os mais férteis. Eles ocupam aproximadamente 20% da área da bacia, são argilosos, pouco erosivos e bem drenados. As culturas principais neles estabelecidas são café, milho, cana de açúcar e soja. Cerca de 30% da área da bacia tem presença de solos Latosol Vermelho Escuro, que naturalmente apresentam baixa fertilidade, mas com baixo potencial erosivo. Nesses, são plantados principalmente cana de açúcar, café, citros, milho e pastagens. As áreas com solos caracterizados como Podzólico Vermelho Amarelo também são utilizadas para atividades agropastoris. Os outros solos, na maioria arenosos, são mais propensos à erosão e são destinados ao cultivo de pastagens (CBH ALPA, 2020).

3.2 Fonte de Informações e Dados

Este estudo tomou por base os 34 municípios compreendidos pela Bacia do ALPA (CBH-ALPA, 2020), dos quais foram provenientes: a) as demandas de água dos diferentes setores econômicos; b) os dados climáticos oriundos do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura (CEPAGRI). O banco de dados meteorológicos foi obtido nas estações meteorológicas do Centro integrado de informações agrometeorológicas **(**CIIAGRO) e quando necessária foi utilizada a pluviometria proveniente do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Os dados climáticos e de vazões médias foram tomados de estações meteorológicas do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo-SIGRHSP e os cenários foram formulados com base nos Cenários A2 e B2 sobre as mudanças climáticas projetadas pelo IPCC de 2014.

Na Figura 9 tem-se a localização dos postos pluviométricos do DAEE na UGRHI 14.

Figura 9 – Localização na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 14, Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, dos postos pluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)



Legenda: Ponto Vermelho=Estação Automática; Ponto Preto = Estação Convencional
Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica-DAEE (2021).

3.3 Etapas de Desenvolvimento do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (MGBALPA)

No presente estudo foi desenvolvido um modelo de simulação de dinâmica de sistemas para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura irrigada e os recursos hídricos na BH do ALPA, São Paulo, com o auxílio do *software* STELLA 10.1.2 para *Windows*. Seu objetivo principal foi o desenvolvimento de um modelo geral utilizando a metodologia de Dinâmica de Sistemas, composto por submodelos específicos, para avaliar os impactos causados por mudanças climáticas globais manifestadas em mudanças de pluviosidade sobre a agricultura irrigada e os recursos hídricos na BH do ALPA.

O modelo foi desenvolvido para servir como instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas no planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos na BH do ALPA. Sua construção foi

estruturada por meio das seguintes etapas: i) conceitualização; ii) formalização; e iii) simulação - essa etapa inclui a avaliação e exploração.

O ambiente STELLA (STELLA, 2001) utiliza elementos básicos para a construção de modelos. A seguir estão descritos os ícones básicos presentes no *software* STELLA:

a) Estoque: representa uma variável que pode ser alterada ao longo do tempo por uma variável do tipo taxa. Essa variável reflete o estado de um sistema;

b) Fluxo: representa uma variável que promoverá a mudança da variável tipo nível ao longo do tempo. Pode ser unidirecional ou bidirecional;

c) Variável auxiliar: representa uma constante ou uma função, sendo nos dois casos utilizada para converter valores. Ela não acumula fluxos e, portanto, não possui “memória” do sistema;

d) Conector: serve para transportar a informação de uma variável para a outra. Quando se usa um conector para ligar duas variáveis, está-se impondo uma relação entre elas.

3.3.1 Etapa de Conceitualização

Essa etapa consistiu na determinação do objeto de estudo modelado. No caso do balanço hídrico, visando sua definição, foram identificados processos que o conformam. Uma vez definidos tais processos, procedeu-se à formulação do diagrama de influência ou círculo da causalidade que representa esse sistema.

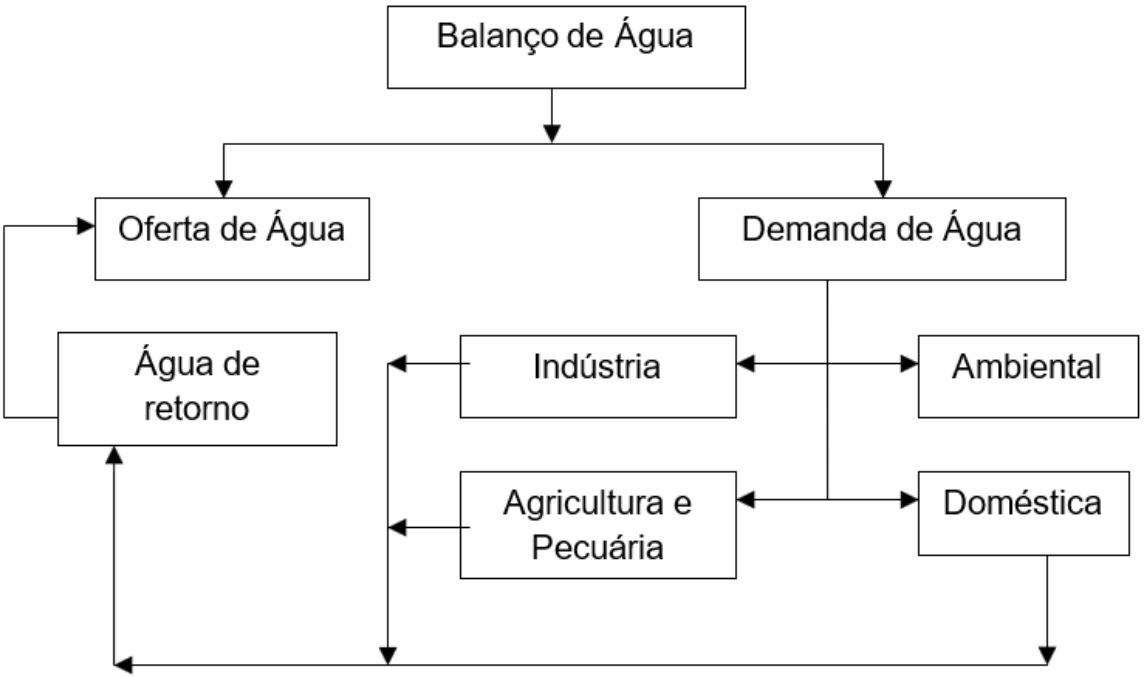
O modelo foi realizado a partir de uma modificação naquele construído por Sánchez-Román, Folegatti e Orellana González (2007). Foi preciso modificá-lo a fim de adaptá-lo às condições particulares da região em estudo e aos objetivos da presente pesquisa.

As principais variáveis e suas respectivas inter-relações foram determinadas utilizando a análise sistêmica, permitindo estabelecer a estrutura do modelo de simulação. O diagrama causal é a estrutura que tem sido utilizado como a estrutura base para o desenvolvimento do diagrama de estoques e fluxos. Baseado nesse último diagrama, são estabelecidas as relações matemáticas que permitem realizar as simulações numéricas comumente chamadas de cenários.

3.3.1.1 Diagrama de Influência ou Círculo de Causalidade

Como já abordado na revisão de literatura, o pensamento sistêmico (PS) se expressa graficamente utilizando o diagrama de influência, também conhecido como círculo de causalidade. É uma das ferramentas do PS por meio do qual as diversas variáveis envolvidas em uma dada questão são apresentadas e relacionadas entre elas. É composto por diversos elementos, os quais são conectados por meio de setas; estas indicam o sentido da alimentação da informação transmitida no ciclo ou da influência entre as diferentes variáveis. Os sinais "+" e "-" indicam respectivamente se o movimento de alimentação está no mesmo sentido, ou seja, de reforço da influência original ou se está em sentido oposto, o que indicaria balanço (NARDELLI; GRIFFITH, 2000). O ponto de partida para elaborar o diagrama de influência foi um esquema de balanço de água representado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma representando a Estrutura do Modelo de Recursos Hídricos



Fonte: Adaptado de Xu *et al*. (2002).

3.3.2 Etapa de Formalização

A partir da construção do diagrama de influência ou círculo de causalidade foi elaborado o respectivo modelo de simulação. Nesta etapa efetuou-se a formalização do diagrama de influência, empregando para isto uma linguagem matemática, com o auxílio do *software Stella* 10.1.2 para *Windows.* Como toda modelagem em DS, o ponto de partida foi a elaboração do diagrama de estoques e fluxos; que permite, posteriormente o desenvolvimento das equações que definem as relações existentes entre os diversos elementos.

3.3.2.1 Descrição Matemática do Modelo

As principais equações do modelo, podem ser divididas em dois grupos: as que constituem a oferta de água e as que formam a demanda dos principais usuários. Maior detalhamento pode ser obtido no Apêndice A que apresenta o código do modelo.

3.3.2.1.1 Estimativa da Oferta de Água

A oferta total de água disponível foi expressa em metros cúbicos por ano (m^3 ano^{-1}), sendo dada pela Equação 1 de balanço de massa:

$$Oferta = Água\ Superficial + Água\ Subtêrranea + Águas\ de\ Reúso \quad (1)$$

3.3.2.1.2 Estimativa das Águas Superficiais

Os recursos hídricos superficiais foram estimados a partir de dados de uma série histórica de 55 anos (1947-2021). Os dados médios de vazão e precipitação utilizados foram os registrados pelo DAEE na estação fluviométrica automática sob o prefixo 5E-002, curso de água identificado como “TAQUARI.R/TAQUARI-GUACU.R/TAQUARI-GUACU OU DOS QUATIS, R”, localizada na latitude 23°57'41"S; longitude: 48°56'59"O; e na estação pluviométrica E5-045 latitude: 23°57'45"S e longitude: 48°56'57"O, respectivamente. Com base nesses dados foi

calculado o coeficiente de escoamento. Os dados foram tomados do Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo-SIGRHSP (2022).

3.3.2.1.3 Estimativa das Águas Freáticas

A disponibilidade de águas freáticas foi estimada a partir da determinação do coeficiente de infiltração calculado a partir dos dados médios de vazão e precipitação registrados na estação automática fluviométrica 5E-002, curso de água “TAQUARI.R/TAQUARI-GUACU.R/TAQUARI-GUACU OU DOS QUATIS, R”, latitude: 23°57'41"S e longitude: 48°56'59"O, e na estação pluviométrica E5-045 latitude: 23°57'45" S e longitude: 48°56'57"O, respectivamente, para uma série histórica de 55 anos (1947-2021). Os dados foram tomados do site do SIGRHSP (2022).

3.3.2.1.4 Estimativa das Águas de Reúso

As águas de reúso na agricultura, segundo Matos (2003), são estimadas como uma percentagem da água usada na irrigação que depende da eficiência do sistema de irrigação. No caso de consumo animal e para as águas de reúso de uso doméstico e industrial considera-se 80% da água consumida como águas residuais.

3.3.2.2 Estimativa da Demanda de Água dos Setores Usuários

A definição dos parâmetros das demandas de água tem como base os requerimentos dos principais consumidores da região em estudo, apresentados em diversos Planos de Bacia, Relatórios sobre a situação dos recursos hídricos e fontes de informação secundaria das agências vinculadas aos setores produtivos e de administração do recurso hídrico na Bacia do ALPA (CBH-ALPA, 2020; SIGRHSP, 2022).

A Equação 2 mostra os cinco componentes que integraram o cálculo da estimativa da demanda de água pelos principais setores usuários.

$$D = DAG + DPOP + DPEC + DIND + DAMB \quad (2)$$

Em que: *D* é a quantidade de água demandada; *DAG* é a demanda de água para usos agrícolas; *DPOP* representa a demanda de água da população para uso doméstico; *DPEC* é a demanda de água do setor pecuário; *DIND* representa a demanda de água usada na indústria; e *DAMB* é a demanda de água destinada a manter a vazão ecológica. Todas essas demandas foram estimadas em $m^3 ano^{-1}$.

3.3.2.2.1 Estimativa da Demanda Agrícola de Água

A demanda de água para agricultura foi estimada com base no requerimento de água por hectare, das cinco principais culturas plantadas na Bacia do ALPA, cana-de-açúcar, trigo, feijão, soja e batata inglesa, sendo calculada usando o *software CropWat* que foi desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) (FAO, 2022).

O *CropWat* calcula as necessidades hídricas de cada cultivo a serem fornecidas pela irrigação, assim como as perdas por ineficiência do sistema de irrigação, o que nos permitiu estimar a demanda total de água por hectare plantado. Com os dados do requerimento de água dessas cinco culturas, foi estimado seu consumo médio em 850 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$. Também foi usado como consumo médio dessas culturas 1.400 $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$, que é o valor estimado por Sales (2014).

A água para irrigação foi estimada multiplicando-se a área total irrigada, em hectare, pelo consumo médio de água dos cultivos, em $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$. Devido à falta de dados, foi decidido usar esse consumo médio das principais culturas, aplicando-o para a agricultura em geral. A área irrigada foi determinada com base nos dados do Plano de Bacia do Alto Paranapanema 2016/2027 (CBH-ALPA, 2016).

A área com irrigação pode variar devido à urbanização e à incorporação de novas terras aos cultivos. A água destinada para irrigação foi estimada pelas Equações 3 e 4.

$$CTC_i = CTC_0(1 + rT_1)(1 + rT_2)\ldots(1 + rT_i) \quad (3)$$

$$DAG = CTC_i * RAC * rT_i \quad (4)$$

Em que: CTC_i é a quantidade de área em hectares utilizada nos cultivos no ano *i; DAG* é a demanda agrícola de água em $m^3 ano^{-1}$*; RAC* é o requerimento médio de

água dos cultivos em m^3 ha^{-1}; e rT_i representa a taxa de crescimento das áreas irrigadas no ano *i*.

A taxa de crescimento das terras agrícolas irrigadas foi estimada pela análise da variação das áreas irrigadas na bacia para o período 2007-2016. Os dados estimados indicaram uma taxa de crescimento anual de 9%.

3.3.2.2.2 Estimativa da Demanda de Água da População

A estimativa da demanda de água da população incluiu o consumo humano, ou seja, as quantidades de água demandadas para uso no lar, tais como cozinhar, limpar e uso sanitário além do abastecimento público.

Usando dados do Plano de Bacia do Alto Paranapanema 2016/2027 (CBH-ALPA, 2016), estimou-se uma taxa de incremento populacional para a Bacia do ALPA de 0,5% ao ano. O consumo estimado per capita para o abastecimento público, segundo o Plano de Bacias do Alto Paranapanema 2012/2015 (CBH ALPA, 2011), é em média de 0,169 m³ habitante dia^{-1}. Tomando como base esses dados para a área da bacia, a demanda populacional foi definida pela população inicial em 2016, pela taxa de crescimento populacional anual e pela taxa de consumo per capita por habitante por ano, mantendo-se ambas as taxas constantes no tempo.

As Equações 5, 6 e 7 foram empregadas no cálculo da estimativa da demanda de água da população (urbana e rural).

$$POP_i = POP_0(1 + rp_1)(1 + rp_2)\ldots(1 + rp_i) \quad (5)$$

$$AP_i = AP_0(1 + rap_1)(1 + rap_2)\ldots(1 + rap_i) \quad (6)$$

$$DPOP = AP_i * POP_i \quad (7)$$

Em que: POP_i representa a população futura para o ano *i*; POP_0 é a população inicial; rp_i é a taxa de crescimento da população no ano *i*, que pode variar a cada ano; AP_i é a demanda de água per capita, mensurada em litros per capita diários, para o ano *i*; AP_0 é a demanda per capita inicial de água; rap_i é a taxa de crescimento do consumo de água no ano *i*, adotou-se a mesma taxa projetada de

crescimento da população na BH do ALPA (0,5%); e *DPOP* é a demanda de água da população para o ano *i,* estimada em m^3ano^{-1}.

3.3.2.2.3 Estimativa da Demanda de Água da Pecuária

Para estimar a demanda de água da pecuária, multiplicou-se o número de animais existentes por espécie pelos requerimentos de água per capita (MATOS, 2003), considerando o consumo direto e o necessário para a limpeza.

A demanda de água para uso pecuário foi estimada pela Equação 8.

$$DPEC = CAN_{x,i} * RAx * rAi \quad (8)$$

Em que: *DPEC* é a demanda de água da pecuária estimada em m^3ano^{-1}; $CAN_{x,\,i}$ representa a quantidade de animais da espécie *x* no ano *i*; *RAx* é a demanda per capita de água da espécie *x* em litros dia^{-1}; e rA_i representa a taxa de crescimento da população animal no ano *i*.

Os dados usados para estimar essa demanda foram tomados do Plano de Bacia do Alto Paranapanema 2016/2027 (CBH- ALPA,2016).

3.3.2.2.4 Estimativa da Demanda Industrial de Água

A demanda de água da indústria foi obtida multiplicando-se a demanda de água da indústria pela taxa de crescimento do setor industrial (Equação 9). Os dados da demanda e a projeção do crescimento foram extraídos dos dados do Plano da Bacia do Alto Paranapanema 2016/2027 (CBH-ALPA, 2016).

$$DIND = INDP_i * \alpha i_i \quad (9)$$

Em que: *DIND* representa a demanda de água da indústria em m^3ano^{-1}; $INDP_i$ é a quantidade de água demandada pela indústria no ano *i*; e $\alpha\ i_i$ é a taxa de crescimento do setor industrial no ano *i*.

3.3.2.2.5 Estimativa da Demanda Ambiental de Água

Para o Ministério do Meio Ambiente- MMA (BRASIL, 2010), depois da retirada da quantidade de água outorgada, nos rios deve permanecer uma vazão mínima a fim de preservar e manter a vida nos ecossistemas aquáticos, sendo que essa vazão mínima é considerada como vazão ecológica.

Para considerar a vazão ecológica no modelo, foram estudadas diversas metodologias visando definir um valor a ser adotado na simulação. Optou-se pelo método desenvolvido por Tennant (MOHARD, 1986), no qual estabelece-se três tipos de vazões ecológicas: mínima, média e ideal, que correspondem a 10, 40 e 60% da vazão média de longo prazo, respectivamente. Segundo o CBH-ALPA (2020), o valor da vazão média de longo prazo ($Q_{média}$) na Bacia do ALPA é de 255 m^3 s^{-1}, logo, os valores para a vazão ecológica utilizados no MGBALPA foram: mínima igual a 25,5 m^3 s^{-1}; média igual a 102 m^3 s^{-1}; e ideal igual a 153 m^3 s^{-1}.

3.3.3 Etapa de Simulação

Para aplicar o MGBALPA, foram avaliados cenários divididos em dois grupos: os cenários cujos parâmetros mantêm os valores estimados, sem incorporar alterações provocadas pela mudança climática, denominado BaU (*Business as Usual*) e outro grupo em que se considerava variações no nível médio da precipitação na BH do ALPA, como descrito no Quadro 3.

Quadro 3 – Cenários avaliados usando o Modelo de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (MGBALPA)

Tendência	Descrição
BaU	Cenários que mantem as tendencias atuais dos parâmetros ou *Business as usual*
Mudança climática	Cenários que incorporam variações na precipitação média da BH do ALPA.

Fonte: Resultados da Investigação.

3.3.3.1 Índices usados para Avaliação do Sistema de Recursos Hídricos Na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

Alguns indicadores foram selecionados para analisar o impacto dos diversos setores componentes do balanço hídrico na sustentabilidade dos recursos hídricos, no MGBALPA.

O índice proposto por Falkenmark define a relação anual entre a água disponível total e o número de habitantes na bacia (FALKENMARK, 1989; FALKENMARK *et al*., 2007). Segundo esse indicador uma bacia tem uma dotação adequada de água se o índice é maior a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. A bacia sofre problemas moderados se o índice oscila entre 1.600 e 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. O estresse hídrico se da em bacias hidrográficas que têm índices de 1.000 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. Considerá-se que a bacia tem escassez crônica de água quando o volume de água disponível está entre 500 e 1000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. Valores menores a 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1} indicam que a bacia sobrepasa o límite de capacidade de manejo dos recursos hídricos (FALKENMARK *et al*., 2007).

Para avaliar o desenvolvimento da BH do ALPA ao longo do tempo, foi usada a análise proposta por Keller, Keller e Davids (1998), que depende da relação entre o consumo anual pelos diversos demandantes e o volume de água disponível anual (UsodAgua). As principais fases de desenvolvimento são:

a) Exploração com estágio I, uso de água é menor que 40% e estágio II, utilização de 40 a 60% da água disponível;

b) Conservação com estágio III correspondendo ao uso de água de 60 até 80%; e estágio IV, de 80 até 90% da água disponível; e

c) Ampliação com estágio V, uso da água de 90 até 95% e estágio VI, na qual utiliza-se mais de 95% da água disponível.

Segundo Keller Keller e Davids (1998), um sistema de recursos hídricos pode ser considerado como "fechado" quando não há água utilizável, deixando o sistema além do necessário para atender ao fluxo mínimo requerido e às exigências do fluxo de saída.

Para avaliar a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos na Bacia do ALPA foi usado o Índice de Sustentabilidade (IS), proposto por Xu *et al*. (2002).

O IS é definido como a relação entre um possível déficit de água e a oferta correspondente numa mesma região, representado pela seguinte relação (Equação 10):

$$IS = \begin{cases} (S - D)/S & S \rangle D \\ 0 & S \leq D \end{cases} \tag{10}$$

Em que: *D* é a demanda de água e *S* é a oferta disponível de água. Se o valor do IS for superior a 0,2, isso indica um baixo ou nenhum estresse na oferta de água, o que significa que a demanda de água é menor ou igual a 80% da oferta potencial desse recurso. Enquanto, valores de IS menores que 0,2 refletem condições de vulnerabilidade, o que indica que a demanda de água é maior que 80% da oferta potencial de água. Um IS igual a 0 indica que a oferta de água é insustentável, ou seja, a demanda de água é maior que toda a disponibilidade de recursos hídricos no local.

3.4 Validação do Modelo

O alvo principal da validação de um modelo baseado em DS é conferir a existência de uma estrutura que reflete o que está acontecendo na realidade, ou seja, para o que foi idealizado, o que significa que o modelo foi capaz de simular a realidade que está sendo estudada. Esse é um aspecto determinante. A intenção da modelagem em DS é servir de base para que os tomadores de decisão possam avaliar diferentes estratégias e políticas a fim de melhorar a performance do sistema.

No entanto, é importante mencionar que para aperfeiçoar o comportamento de um sistema é necessário ter confiança na estrutura do modelo. Para isto, devem-se efetuar testes de validação, cuja ênfase deve estar orientada, prioritariamente, em cumprir padrões de predição, mais do que a resultados precisos, especialmente, quando são modelos desenvolvidos para apresentar possíveis realidades de longo prazo dos sistemas em estudo (BARLAS, 1996).

A validação de um modelo por meio de uma série de dados é puramente operacional. Na validação do MGBALPA, tomou-se como ponto de partida um modelo conceitualmente validado (o balanço de água), que foi revisado para

determinar seu funcionamento operacional. Assim mesmo foram feitas análises para conferir a consistencia das unidades.

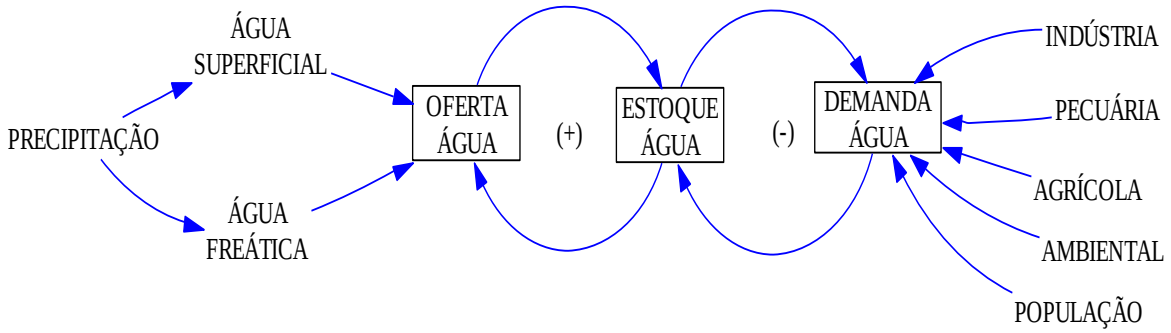
Utilizando o modelo desenvolvido na plataforma STELLA, realizou-se a simulação dos cenários para um período de 55 anos, de 2016 a 2070.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagrama de Influência

A Figura 11 apresenta o diagrama de influência que representa a estrutura do sistema dos recursos hídricos da BH do ALPA. Nela são representadas as interações que existem entre os diferentes componentes básicos do sistema. Essas interações são as que proporcionam as características estruturais do sistema objeto de estudo.

Figura 11 – Diagrama de Influência do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (MGBALPA)



Fonte: Resultados da Investigação.

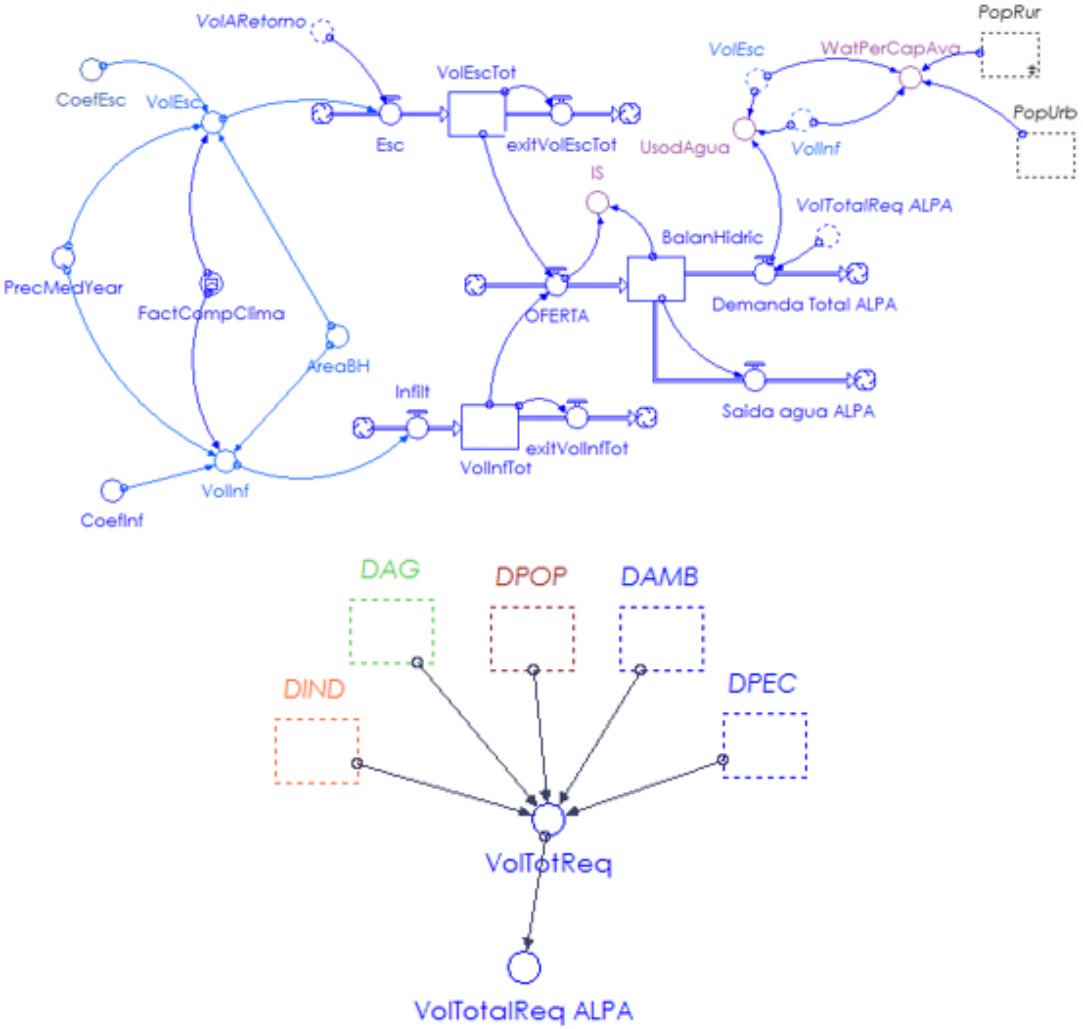
As variáveis principais que representam a oferta de água são: água superficial e a água freática, que para os objetivos e limites desta pesquisam foram determinadas pela precipitação. Ambas garantem o estoque de água que fornece os volumes demandados na BH do ALPA. Essa demanda de água, por sua vez, foi constituída pela demanda dos setores: indústria, pecuária, agrícola, ambiental e população.

4.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

O diagrama de influência do modelo (Figura 11) permite desenvolver, utilizando a interface gráfica do *software* STELLA, o diagrama de estoque e fluxo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema representado. O MGBALPA simula os processos relacionados com o balanço hídrico na Bacia do

ALPA. A Figura 12 apresenta o setor da oferta de água e o setor da demanda de água, ambos submodelos que formam parte do MGBALPA.

Figura 12 – Modelo de Simulação construído no *Software* STELLA



Legenda: coefEsc = coeficiente de escoamento; VolARetorno = águas de reúso; Esc = escoamento; PrecMedYear = precipitação média ano; CoefInf = coeficiente de infiltração; VolInf = volume infiltrado; FactCompClima = fator climático; VolEsc = volume escoado; AreaBH = área da bacia; VolEscTota = volume escoado total; IS=índice de sustentabilidade; ExitVolEscTotal =saída volume escoado total, OFERTA = oferta de água; Infi l= infiltração; VolInfTotal = volume infiltrado total; exitVolInfTot = saída volume infiltrado total; Saída agua ALPA = saída de água da bacia do ALPA; Demanda Total ALPA = demanda total de água bacia do ALPA; BalanHidric = balanço hídrico; VolTotalReq ALPA = volume total de água requerido na BH do ALPA; UsodAgua = Índice de uso de água; WatPerCapAva = Índice de Falkenmark; PopRura = população rural; PopUrb = população urbana; DIND = demanda indústria; DAG = demanda agrícola; DPOP = demanda população; DAMB = demanda ambiental; DPEC = demanda pecuária; VolTotReq = volume total requerido de água.
Fonte: Resultados da Investigação.

A conversão se deu da seguinte forma: uma vez representados no diagrama de influência, os componentes principais do MGBALPA (precipitação, oferta e demandas de água) e as relações principais existentes entre eles, foram codificados

em C++, a linguagem do *software* STELLA. As estruturas básicas para a representação do diagrama são os estoques e os fluxos.

A DS considera que os estoques representam as condições de disponibilidades de recursos e informam o estado de uma certa situação; suas variações são influenciadas pelas trocas promovidas nos fluxos. Neste modelo, os estoques principais do MGBALPA foram: “oferta de água”, “estoque de água” e “demanda de água”.

Os fluxos são representados na DS por linhas tendo válvulas, que identificam as ações que irão acumular ou esvaziar os estoques. Representam como os fatos estão se desenrolando, sendo variáveis dependentes do tempo e estruturas que geram ação.

Nos submodelos desenvolvidos, existem variáveis que provocam fluxos, conhecidas como taxas, que permitem controlar o comportamento geral do modelo. São geralmente também denominadas como variáveis auxiliares ou constantes. Neste modelo, estão alimentando a oferta hídrica (fluxos de entrada) e esvaziando essa oferta, que são as demandas de água ou fluxos de saída de água. O outro elemento do modelo, evidenciado no diagrama de estoques e fluxos como variável auxiliar e que determina os fluxos, é a precipitação.

No diagrama de influência e no diagrama de estoques e fluxos, as relações entre as variáveis são representadas utilizando setas, sendo chamadas de conectores. Esses conectores vinculam estoques, variáveis auxiliares e constantes, caso seja necessário. Também, quando preciso, conectam os estoques aos fluxos; e variáveis auxiliares ou constantes a outras variáveis auxiliares ou constantes.

4.3 Apresentação e Descrição Estrutural do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

Os modelos de DS, sendo dependentes do tempo, são construídos utilizando equações diferenciais. Estas são matematicamente resolvidas, para um determinado período, por um algoritmo desenvolvido em C++.

A seguir são apresentadas as principais equações inseridas no modelo, sendo que o código do modelo está descrito no Apêndice A.

O MGBALPA é um modelo de simulação explícito do sistema de recursos hídricos da BH do ALPA.

As equações do balanço hídrico (Equação 11) e da demanda total (Equação 12) na BH do ALPA, expressas como equações diferenciais no MGBALPA, são dadas por:

$$Balan_{Hidric}(t) = Balan_{Hidric}(t - dt) + (OFERTA - Saida_agua_BHALPA - Demanda_Total_ALPA) * dt \quad (11)$$

$$Demanda_Total_ALPA = DAG + DAMB + DIND + DPOP + DPEC \quad (12)$$

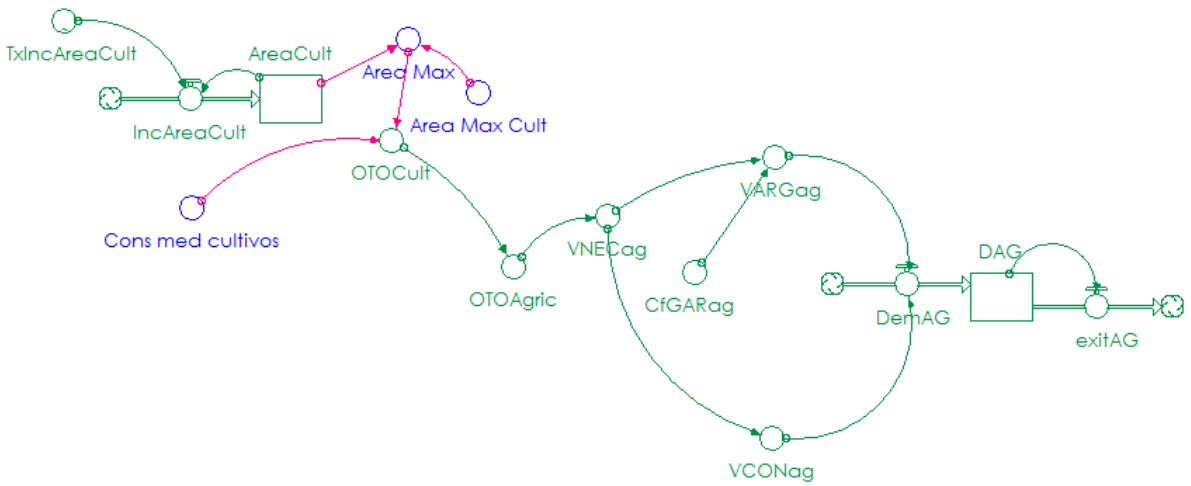
Em que:

$Balan_{Hidric}(t)$ é o balanço hídrico no ano *t* (m^3 ano^{-1}); OFERTA é a oferta de água no ano *t* (m^3 ano^{-1}); Saida_agua_ALPA é o volume de água descarregado a jusante da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, SP (m^3 ano^{-1}); Demanda_Total_ALPA é o volume de água total demandado pelas diversas atividades econômicas na Bacia Hidrográfica (m^3 ano^{-1}); DAG é o volume total de água requerido pela agricultura (m^3 ano^{-1}); DAMB é o volume total de água requerido para garantir a vazão ecológica (m^3 ano^{-1}); DIND é o volume total de água requerido pela indústria (m^3 ano^{-1}); DPOP é o volume total de água requerido pelas populações rural e urbana (m^3 ano^{-1}); e DPEC é o volume total de água requerido pela pecuária (m^3 ano^{-1}).

Dentro do MGBALPA existem 10 setores ou submodelos para representar o comportamento dos diversos componentes da BH do ALPA. Esses submodelos são divididos em três grupos principais: de demanda, de oferta, e aqueles que realizam cálculos específicos para simular os diferentes elementos estudados. Dentro do setor das demandas tem-se: agricultura, pecuária, ambiental, população e indústria. No submodelo da oferta tem-se a oferta de água; e no submodelo de cálculos específicos tem-se: volume de águas residuais retornadas, volume total requerido na BH do ALPA, receita gerada pela outorga e equivalente populacional.

A Figura 13 representa a estrutura do sistema de recursos hídricos vinculado ao setor agrícola na região de estudo e proposta no MGBALPA.

Figura 13 – Setor Demanda Agrícola no Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

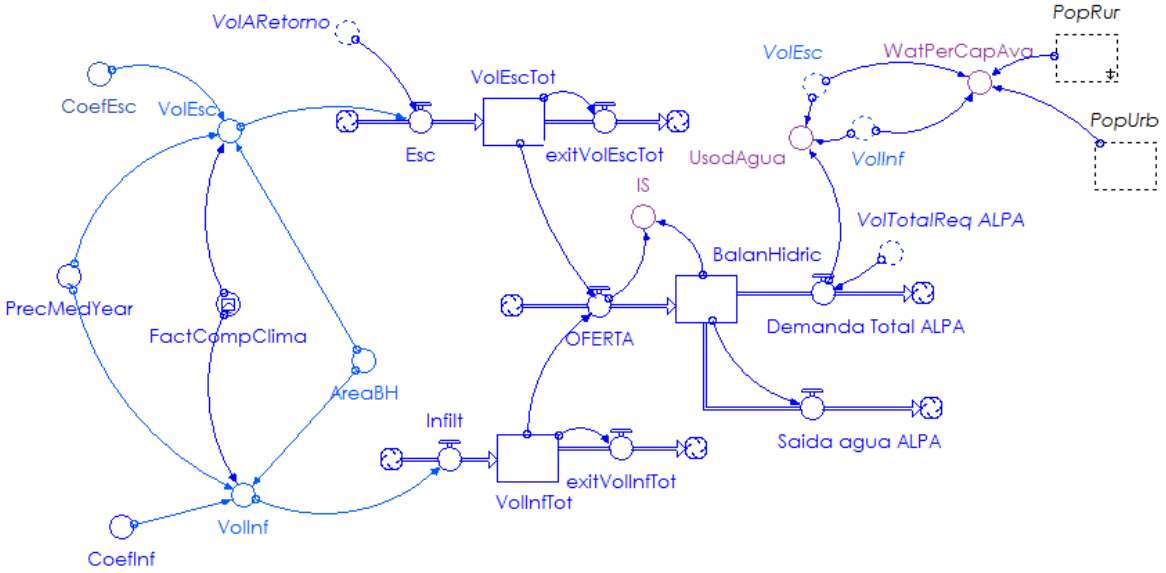


Legenda: TxIncAreaCult = taxa crescimento área plantada; IncAreaCult = crescimento área plantada; AreaCult = área plantada; AreaMax = área máxima cultivos; OTOCult = outorga cultivos; Cons med cultivos = consumo médio de água dos cultivos; Area Max Cult = área máxima disponível para os cultivos; OTOAgric = outorga agricultura; VNECag = outorga agrícola; VARGag = volume requerido de água na agricultura; CFGARag = eficiência da irrigação; VCONag = consumo água na agricultura; DemAG = demanda agrícola; DAG = estoque demanda agrícola; existAG = saída água agricultura.
Fonte: Resultados da Investigação.

A variável que representa a irrigação (Figura 13) é “Cons med cultivos" expresso em m^3 ha^{-1}. O estoque “AreaCult”, expresso em ha, representa a área dos cultivos e o estoque “DAG” representa o volume total requerido pela agricultura, expresso em m^3 ano^{-1}. Ressalta-se que o volume de água demandado, considera a demanda líquida do cultivo mais as ineficiências dos sistemas de irrigação.

A Figura 14 representa a estrutura do sistema de recursos hídricos vinculados à oferta de água na região de estudo e proposta no MGBALPA.

Figura 14 – Setor Oferta de Água no Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema



Legenda: coefEsc = coeficente de escoamento; VolARetorno = águas de reúso; Esc = escoamento; PrecMedYear = precipitação média ano; CoefInf = coeficente de infiltração; VolInf = volume infiltrado; FactCompClima = fator climático; VolEsc = volume escoado; AreaBH = área bacia; VolEscTota = volume escoado total; IS = índice de sustentabilidade; ExitVolEscTotal = saída volume escoado total; OFERTA = oferta de água; Infil = infiltração; VolInfTotal = volume infiltrado total; exitVolInfTot = saída volume infiltrado total; Saída agua ALPA = saida de água da bacia do ALPA; Demanda Total ALPA = demanda total de água bacia do ALPA; BalanHidric = balanço hídrico; VolTotalReq ALPA = volume total de água requerido na BH do ALPA; UsodAgua = Índice de uso de água; WatPerCapAva = Índice de Falkenmark; PopRura = população rural; PopUrb = população urbana.
Fonte: Resultados da Investigação.

As variáveis que representaram a oferta de água tiveram os volumes aportados pela chuva anualmente, e foram: o volume escoado (VolEsc) o volume infiltrado (VolInf) e adicionalmente, as águas de reúso (VolARetorno) (Figura 14). Todas elas expressas em milhões de metros cúbicos por ano (MMC ano^{-1}).

O balanço hídrico (BalanHidric) foi calculado pela diferença entre a “Demanda Total ALPA” e as águas que descarregam a jusante da BH, “Saída agua ALPA”. De posse dessa informação, foram determinados o Índice de Sustentabilidade, “IS”, o volume de água disponível por pessoa anual, “WatPerCapAva”, e a relação entre a demanda anual dos diversos consumidores e o volume de água disponível anual “UsodAgua” (Figura 14).

4.4 Cenários do Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

Os cenários formulados foram divididos em dois grupos: um grupo sem variação nos parâmetros, mantendo-se, portanto, as tendências atuais; e outro grupo, que

contém cenários alternativos, nos quais os parâmetros vêm sendo modificados a fim de gerar-se um prognóstico de como o balanço hídrico da Bacia do ALPA se comporta perante as alterações provocadas pela mudança climática, incrementos na quantidade de áreas irrigadas e variações na vazão ecológica. No total foram formulados sete cenários, conforme descrito no Quadro 4.

Quadro 4 – Cenários avaliados nas simulações efetuadas com o Modelo Geral da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema

Cenário	Tendência	Precipitação (mm ano^{-1})	Consumo água cultivos (m^{3}ha^{-1})	Crescimento área terras irrigadas (%)	Vazão ecológica (m^{3}s^{-1})
BaU.1	*Business as Usual*	1.200	1.400	9	25
BaU.2	*Business as Usual*	Série 1947-2021	1.400	9	25
BaU.3	*Business as Usual*	1.200	850 e 1.400	9	25
BaU.4	*Business as Usual*	1.200	1.400	9 e 18	25
BaU.5	*Business as Usual*	1.200	1.400	9	102 e 153
MC1	Mudança climática	600 (-50%) 840 (-30%) 1.560 (+30%)	1.400	9	25
MC2	Mudança climática	600 (-50%) 840 (-30%) 1.560 (+30%)	1.400	18	153

Legenda: BaU=Business as Usual; MC=mudança climática.

Fonte: Resultados da investigação.

As simulações dos cenários descritos no Quadro 4 foram feitas no programa STELLA, com as seguintes especificações:

i)Horizonte temporal: o período simulado foi de 2016 a 2070, o que resultou num horizonte de 55 simulações anuais;

ii) Passagem do tempo ou *timestep*: equivalente a uma unidade; e

iii) Método de integração: constituído por equações diferenciais resolvidas por meio do método de Euler.

Para o cenário *Business as Usual*, foram empregados os parâmetros descritos no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros principais do cenário *Business as Usual*

Parâmetro	Periodo de 2016 a 2070
Crescimento populacional (%)	0,5
Demanda per capita de água (L hab^{-1} d^{-1}):	169
Crescimento das áreas irrigadas (%)	9,00
Consumo médio de água das culturas (m^3 ha^{-1})	1.400
Área territorial BH do ALPA (km^2)	22.734
Área de drenagem BH do ALPA (km^2)	22.689
Precipitação média (mm ano^{-1})	1.200
Vazão ecológica mínima (m^3s^{-1})	25

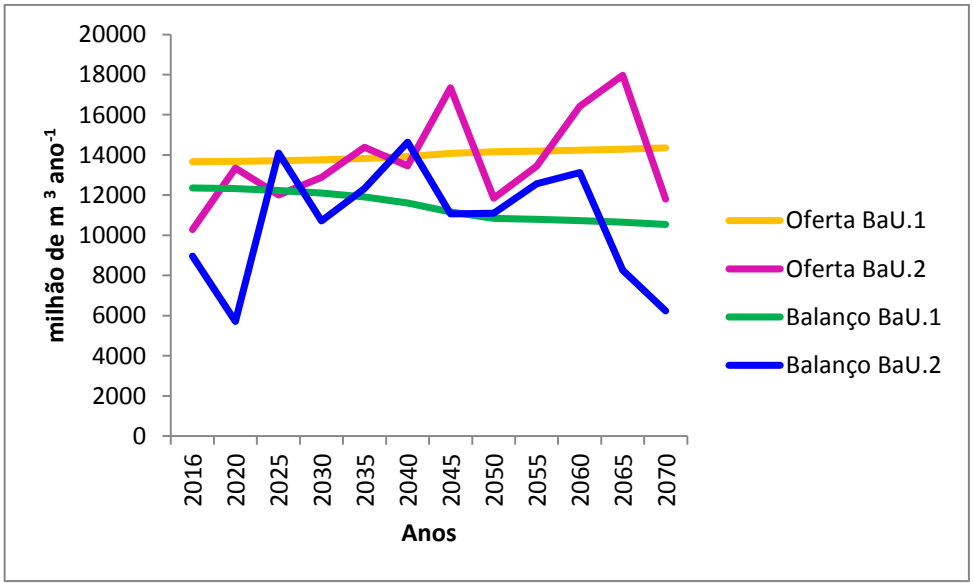
Fonte: Resultados da investigação.

4.4.1 Resultados Cenários BaU

a) Cenários BaU.1 e BaU.2: BaU.1 com Precipitação Média e BaU.2 com Precipitações Série 1947-2021

A Figura 15 mostra que no período simulado de 2016 a 2070, o cenário BaU.1 com precipitação anual média de 1.200 mm, a demanda total de água na BH do ALPA em 2016 representa 10% da oferta disponível. Em 2070, período final da simulação, alcança 27% da oferta disponível o que equivale a quase triplicar seu valor ao longo do tempo de simulação.

Figura 15 – Balanço Hídrico cenários BaU.1 e BaU.2, em milhão de m^3 ano^{-1}



Legenda: Oferta BaU.1=oferta de água cenário BaU.1, Oferta BaU.2= oferta de água cenário BaU.2, Balanço BaU.1= balanço hídrico cenário BaU.1, Balanço BaU.2= balanço hídrico cenário BaU.2.
Fonte: Resultados da investigação.

O cenário BaU.2, que utiliza as precipitações da série 1947-2021, apresenta oscilações na oferta disponível que estão em função das variações na precipitação. Neste cenário a demanda total de água em 2016 representa 13% da oferta disponível, enquanto em 2070, período final da simulação, alcança 33% da oferta disponível o que equivale, como no cenário anterior, a quase triplicar seu valor no período simulado (Figura 15).

O Quadro 6 apresenta um resumo dos Índices utilizados para avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na BH do ALPA no BaU.1, cenário com precipitação média de 1.200 mm, e no BaU.2, cenário com precipitações da série 1947-2021.

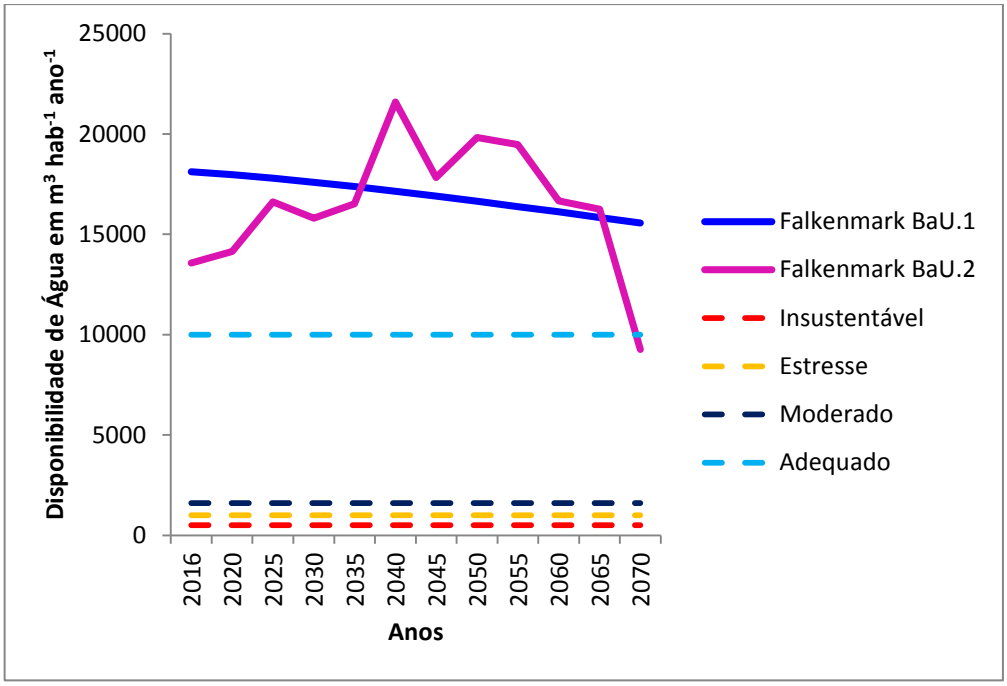
Quadro 6 – Índices para Avaliar a Sustentabilidade dos Recursos Hídricos na BH do Alpa para os cenários BaU.1 e BaU.2

	Falkenmark (m^3 hab^{-1} ano^{-1})		**Keller (%)**		**IS**	
Anos	**BaU.1**	**BaU.2**	**BaU.1**	**BaU.2**	**BaU.1**	**BaU.2**
2016	18.111	13.569	10	13	0,90	0,87
2020	17.978	14.143	10	13	0,90	0,43
2025	17.794	16.622	11	12	0,89	1,17
2030	17.592	15.804	12	14	0,88	0,83
2035	17.375	16.521	15	15	0,86	0,86
2040	17.145	21.602	18	14	0,83	1,09
2045	16.902	17.831	22	21	0,79	0,64
2050	16.648	19.825	25	21	0,77	0,94
2055	16.386	19.472	25	21	0,76	0,93
2060	16.116	16.666	26	25	0,75	0,80
2065	15.840	16.249	27	26	0,75	0,46
2070	15.559	9.257	28	48	0,73	0,53

Legenda: IS= Índice de Sustentabilidade
Fonte: Resultados da investigação

Observa-se na Figura 16, que o valor do Índice de Falkenmark no cenário BaU.1 com precipitação média, no ano de 2016, é de 18.111 m^3 hab^{-1} ano^{-1} na BH do ALPA; em 2050 é de 16.648 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; e em 2070, final do período de simulação, atinge 15.559 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. Com respeito a esse cenário, pode-se concluir que a situação de disponibilidade hídrica em m^3 hab^{-1} ano^{-1} é bastante confortável. Segundo esse indicador, uma bacia tem uma dotação adequada de água se o índice é maior a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.

Figura 16 – Índice de Falkenmark Cenários BaU.1 e BaU.2



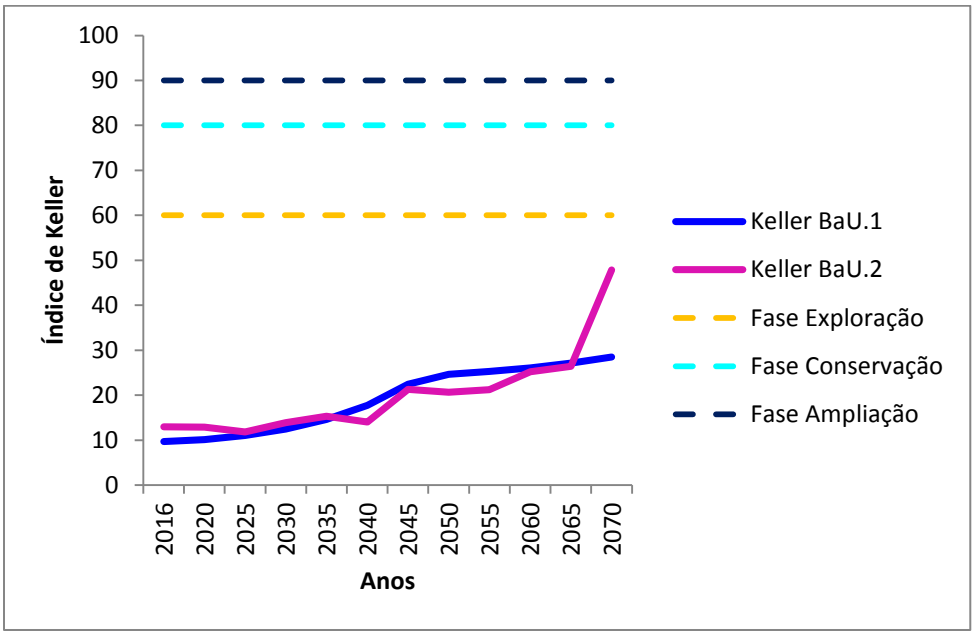
Legenda: Falkenmark BaU.1=Índice de Falkenmark cenário BaU.1, Falkenmark BaU.2= Índice de Falkenmark cenário BaU.2; Insustentável= menor que 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Estresse= no intervalo de 500 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Moderado= no intervalo de 1.600 a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Adequado= maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.
Fonte: Resultados da investigação.

No cenário BaU.2, que utiliza a série de precipitações de 1947 a 2021, o Índice de Falkenmark apresenta oscilações em função das precipitações, partindo de 13.569 m^3 hab^{-1} ano^{-1} em 2016, passando por 19.825 m^3 hab^{-1} ano^{-1} em 2050 e chegando a 9.257 m^3 hab^{-1} ano^{-1} em 2070. Neste cenário, no periodo de 2016 a 2065, observa-se o mesmo que no cenário BaU.1. Mesmo com as oscilações das precipitações e a diminuição da disponibilidade de água em m^3 hab^{-1} ano^{-1}, o sistema permite fornecer água em quantidade adequada com respeito a população da bacia, visto que a disponibilidade se encontra acima de 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. Entretanto, essa situação muda a partir de 2070, pois a bacia começa a apresentar problemas moderados de água, com o índice apresentando valor menor que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1} (9.257 m^3 hab^{-1} ano^{-1}) (Figura 16).

A Figura 17, apresenta o Índice de Keller nos cenários BaU.1 e BaU.2. O Índice permite analisar o desenvolvimento da bacia. Segundo Keller, Keller e Davids (1998), o desenvolvimento de uma bacia depende da relação entre o consumo anual pelos diversos demandantes e o volume anual de água disponível. As principais

fases de desenvolvimento são: Exploração, estágios I e II; Conservação, estágios III e IV e Ampliação, estágios V e VI.

Figura 17 – Índice de Keller BaU.1 e BaU.2

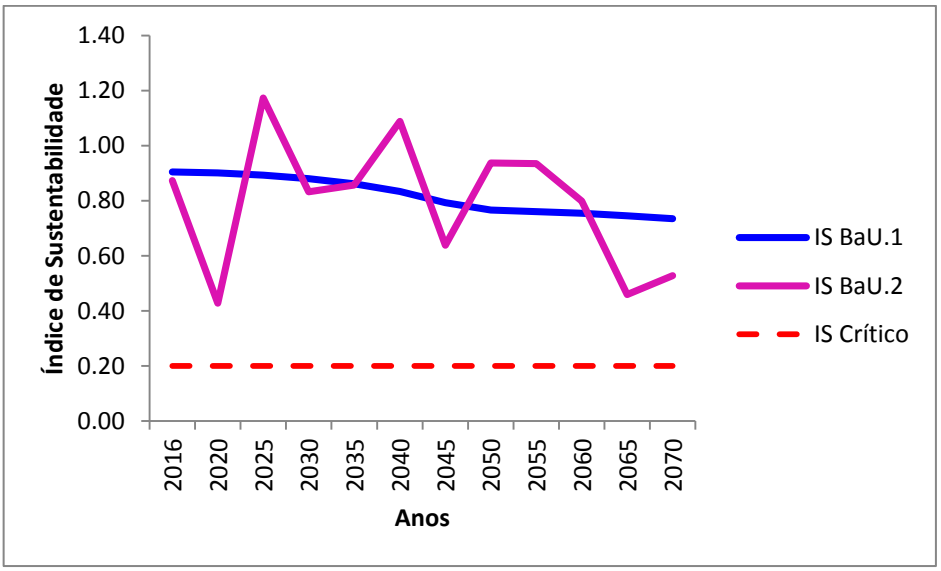


Legenda: Keller BaU.1= Índice de Keller cenário BaU.1; Keller BaU.2= Índice de Keller cenário BaU.2; Fase Exploração= a bacia usa até 60% da água (estágio I: a bacia usa menos que 40% da água, estágio II: a bacia usa 40 a 60% da água); Fase Conservação= a bacia usa de 60 a 80% da água; Fase Ampliação= a bacia usa mais de 90% da água.
Fonte: Resultados da investigação.

De acordo com esse Índice, a BH do ALPA encontra-se em 2016, em ambos cenários, no estágio I da Fase de Exploração, o que significa que o sistema de recursos hídricos da bacia é amplamente aberto (Figura 17). O principal meio para satisfazer a crescente demanda é simplesmente desviar mais suprimento e bombear água de aquíferos de águas subterrâneas rasas, não sendo necessário implementar medidas para a redução da demanda. Esta situação se mantém até o final do período de simulação. No entanto, para 2070, no cenário BaU.2, a BH do ALPA passa para a Fase de exploração do estágio II, sendo necessária a construção de sistemas de armazenamento, ampliando o sistema de distribuição e requerendo bombeamento a partir de aquíferos profundos. Isto torna-se necessário quando os somatórios da vazão líquida retirada e dos requerimentos mínimos de vazão instantânea nos corpos hídricos superficiais, começam a exceder a vazão disponível nos períodos de vazão mínima.

Na Figura 18, apresenta-se o Índice de Sustentabilidade (IS), proposto por Xu *et al.* (2002), para os cenários BaU.1 e BaU.2. Essa Figura mostra que em 2016, o IS no cenário BaU.1 era de 0,90 e que chegará a 0,77 em 2050, e a 0,73 em 2070. O cenário BaU.2 apresenta oscilações dependentes das mudanças na oferta de água disponível causada pela variação das precipitações. Os valores menores de IS ocorreram em 2020 e 2065, sendo iguais a 0,43 e 0,46 respectivamente, e os maiores em 2025, igual a 1,17 e em 2040, valendo 1,09.

Figura 18 – Índice de Sustentabilidade – IS BaU.1 e BaU.2



Legenda: IS BaU.1=Índice de Sustentabilidade cenário BaU.1; IS BaU.2= Índice de Sustentabilidade cenário BaU.2; IS Crítico= índice menor que 0,2 equivale à estresse hídrico e vulnerabilidade no uso dos recursos hídricos.
Fonte: Resultados da investigação.

No processo de cálculo de IS foram consideradas as águas de reúso como parte da oferta das águas disponíveis na BH do ALPA. Quando o valor de IS é maior do que 0,2, indica que existe baixo ou nenhum estresse na oferta de água, mas quando os valores de IS são menores que 0,2, isto reflete condições de vulnerabilidade dos recursos hídricos. Valores iguais a zero indicam que a oferta é insustentável. Em ambos cenários, o valor do IS é maior que 0,2, indicando que existe baixo ou nenhum estresse na oferta de água disponível no local (Figura 18).

Observando o Quadro 7 e a Figura 19, nota-se que as demandas em ambos cenários são iguais, pois não dependem das variações nas precipitações. A demanda ambiental se mantém em 804 MMC ano^{-1}, constante ao longo do período de simulação; a demanda do setor agrícola e pecuário representa 19% da demanda

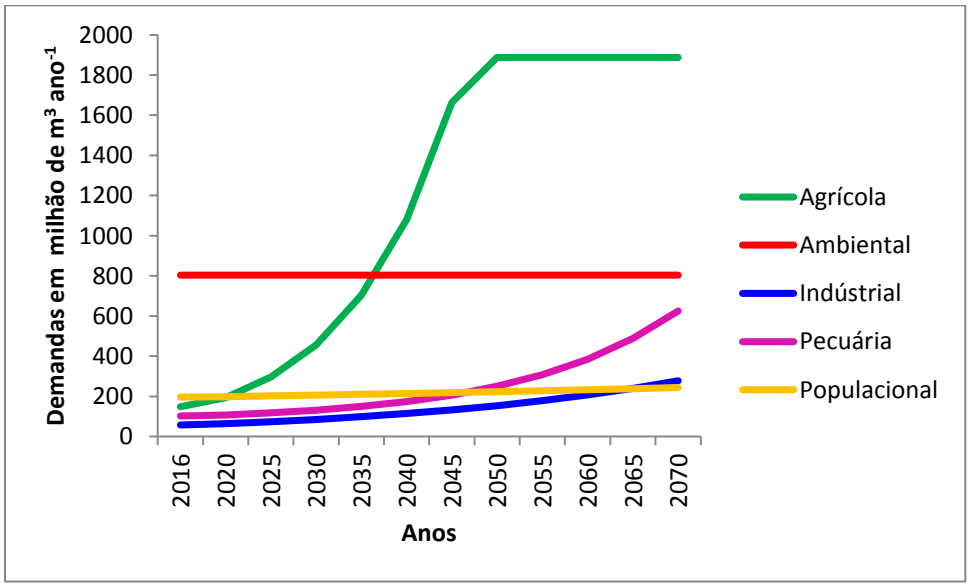
total em 2016; 64% em 2050, chegando em 2070 a representar um 65% da demanda total. A demanda do setor industrial passa de 4% da demanda total em 2016 a 7% em 2070 e a demanda da população vai de 15% da demanda total em 2016 a 6% em 2070, devido a baixa taxa de crescimento da população na BH do ALPA.

Quadro 7 – Demanda por Setores Econômicos em milhão de m^3 ano^{-1}, para BaU.1 e BaU2

Anos	Agrícola	Ambiental	Indústria	Pecuária	Populacional	Demanda Total
2016	149	804	58	102	196	1.309
2020	193	804	63	107	198	1.366
2025	297	804	74	118	202	1.494
2030	457	804	85	131	206	1.683
2035	703	804	99	150	210	1.965
2040	1081	804	115	174	214	2.388
2045	1663	804	133	207	219	3.026
2050	1887	804	154	250	223	3.319
2055	1887	804	178	308	228	3.406
2060	1887	804	207	385	233	3.516
2065	1887	804	240	488	238	3.658
2070	1887	804	278	626	244	3.839

Fonte: Resultados da investigação.

Figura 19 – Demanda por Setores Econômicos em milhão de m^3 ano^{-1} para BaU.1 e BaU.2



Fonte: Resultados da investigação.

b) Cenário BaU.3: *Business as Usual* com Precipitação Média de 1200 mm ano^{-1} e Consumo Médio dos Cultivos de 850 m^3 ha^{-1} e 1.400 m^3 ha^{-1}

O que muda neste cenário é a demanda agrícola devido à variação no consumo médio dos cultivos, passando de 850 para 1.400 m^3 ha^{-1}. Como pode ser observado no Quadro 8, a variação da demanda agrícola impactará nos Índices de Keller e de Sustentabilidade. Quando o consumo médio dos cultivos é de 1.400 m^3 ha^{-1}, o Índice de Keller vai de 10% de uso de água na bacia em 2016 para 28% em 2070, o que indica que a bacia encontra-se no estágio I da Fase de Exploração. Quando se utilizam 850 m^3 ha^{-1}, o Índice de Keller é de 9% em 2016 e atinge 23% de uso de água em 2070 (Fase de Exploração, estágio I), observando-se uma ligera redução no uso da água em relação ao cenário anterior. O Índice de Falkenmark neste cenário se mantém igual aos resultados obtidos no cenário BaU.1.

Quadro 8 – Índices para Avaliar a Sustentabilidade dos Recursos Hídricos na BH do Alpa Cenário BaU.3

	Índice de Keller (%)		IS	
Anos	**1.400 m^3 ha^{-1}**	**850 m^3 ha^{-1}**	**1.400 m^3 ha^{-1}**	**850 m^3 ha^{-1}**
2016	10	9	0,90	0,91
2020	10	10	0,90	0,91
2025	11	10	0,89	0,90
2030	12	11	0,88	0,89
2035	15	13	0,86	0,88
2040	18	15	0,83	0,86
2045	22	18	0,79	0,83
2050	25	19	0,77	0,82
2055	25	20	0,76	0,81
2060	26	21	0,75	0,80
2065	27	22	0,75	0,79
2070	28	23	0,73	0,78

Legenda: IS= Índice de Sustentabilidade.
Fonte: Resultados da investigação.

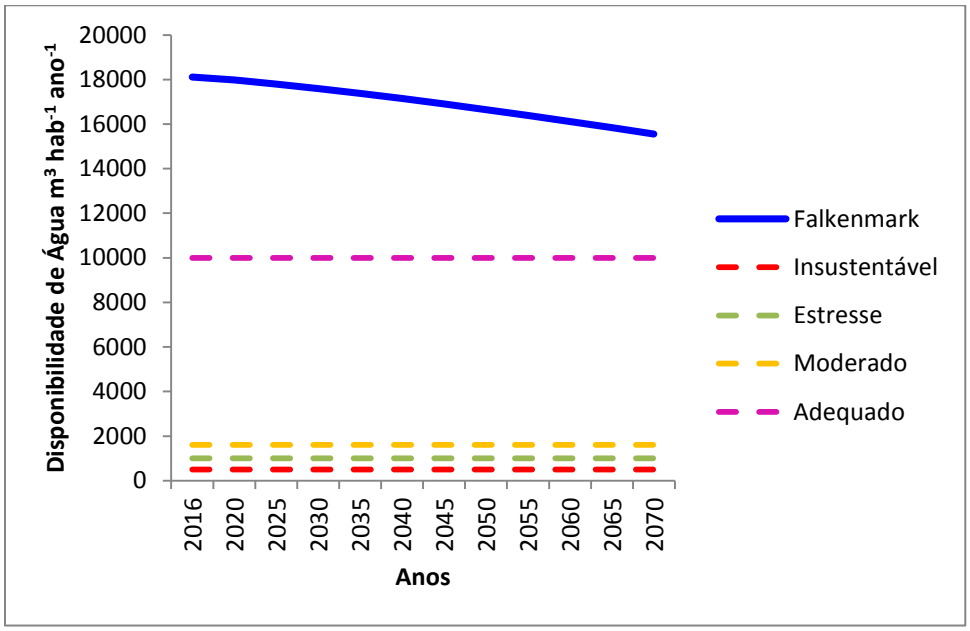
O IS quando o consumo médio dos cultivos é de 1.400 m^3 ha^{-1} era de 0,90 em 2016, chegando a 0,77 em 2050, e a 0,73 em 2070. Usando 850 m^3 ha^{-1}, o IS é de 0,91 em 2016, de 0,82 em 2050 e termina em 0,78 em 2070, sendo ligeiramente maior que na situação do consumo médio dos cultivos de 1.400 m^3 ha^{-1} (Quadro 8). A diferença entre os IS's não é muito significativa, evidenciando que a diferença no

consumo médio dos cultivos não repercute na sustentabilidade do sistema de forma geral.

c) Cenário BaU.4: *Business as Usual* com Precipitação Média de 1200 mm ano^{-1} e Incremento de 100% na Taxa de Crescimento Anual das Terras Irrigadas

No Cenario BaU.4 se incorporou à simulação uma variação de 100% na taxa de crescimento das terras irrigadas, passando de 9% para 18% ao ano. O Índice de Falkenmark, Figura 20, não apresentou variações, mantendo-se similar aos cenários anteriores durante todo o periodo de simulação.

Figura 20 – Índice de Falkenmark BaU.4

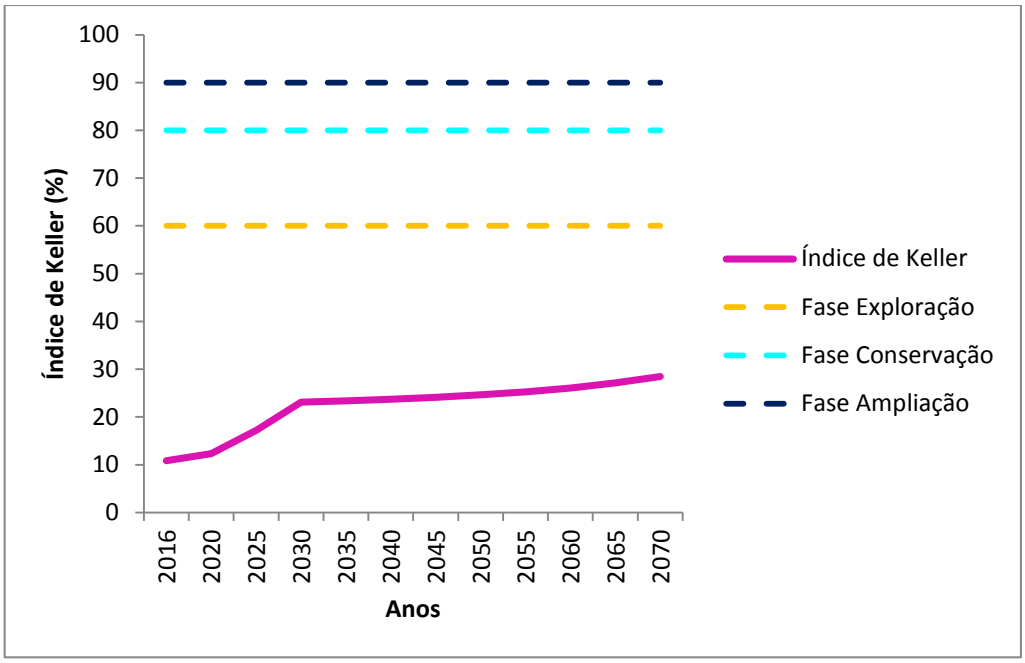


Legenda: Falkenmark= Índice de Falkenmark; Insustentável= menor que 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Estresse= no intervalo de 500 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Moderado= no intervalo de 1.600 a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Adequado= maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.
Fonte: Resultados da investigação.

O Índice de Keller (Figura 21) variou de 11% de uso de água na bacia em 2016 para 28% em 2070, o que indica que a bacia se encontra no estágio I da Fase de Exploração. Observando o período de simulação, verifica-se que este índice quase não apresentou alterações em relação ao cenário BaU.1 com taxa de crescimento das terras irrigadas de 9%. (Quadro 6). O mesmo ocorre com o Índice de Sustentabilidade (Figura 22), que em 2016 era de 0,89, e chegará a 0,77 em 2050, e

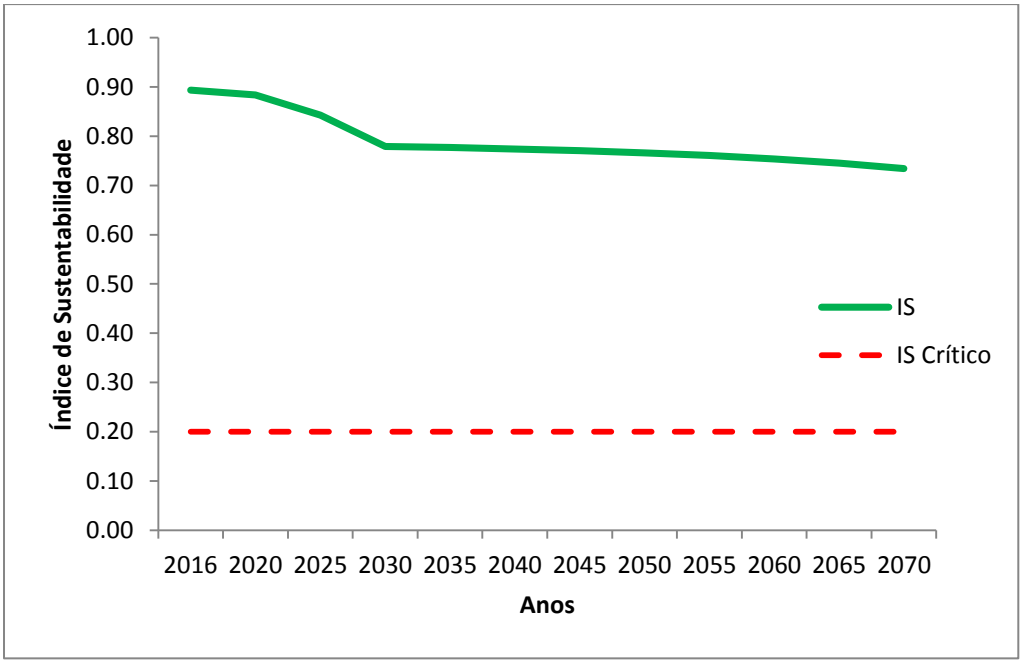
a 0,73 em 2070, mostrando que o sistema opera de forma sustentável no que se refere ao uso dos recursos hídricos. De acordo a esses resultados, pode-se concluir que a variação da taxa de crescimento das terras irrigadas não afeta a sustentabilidade do sistema. Este indicador, quando avaliado de forma isolada, não gera maiores impactos no sistema. Com respeito ao uso de água para irrigação, é importante sinalizar a falta de uma série histórica de dados confiáveis e atualizados sobre a quantidade de terras efetivamente irrigadas na BH do ALPA e seu ritmo de crescimento anual.

Figura 21 – Índice de Keller BaU.4



Legenda: Fase Exploração= a bacia usa até 60% da água (estágio I: a bacia usa menos que 40% da água, estágio II: a bacia usa 40 a 60% da água); Fase Conservação= a bacia usa de 60 a 80% da água; Fase Ampliação= a bacia usa mais de 90% da água.
Fonte: Resultados da investigação.

Figura 22 – Índice de Sustentabilidade – IS Bau.4



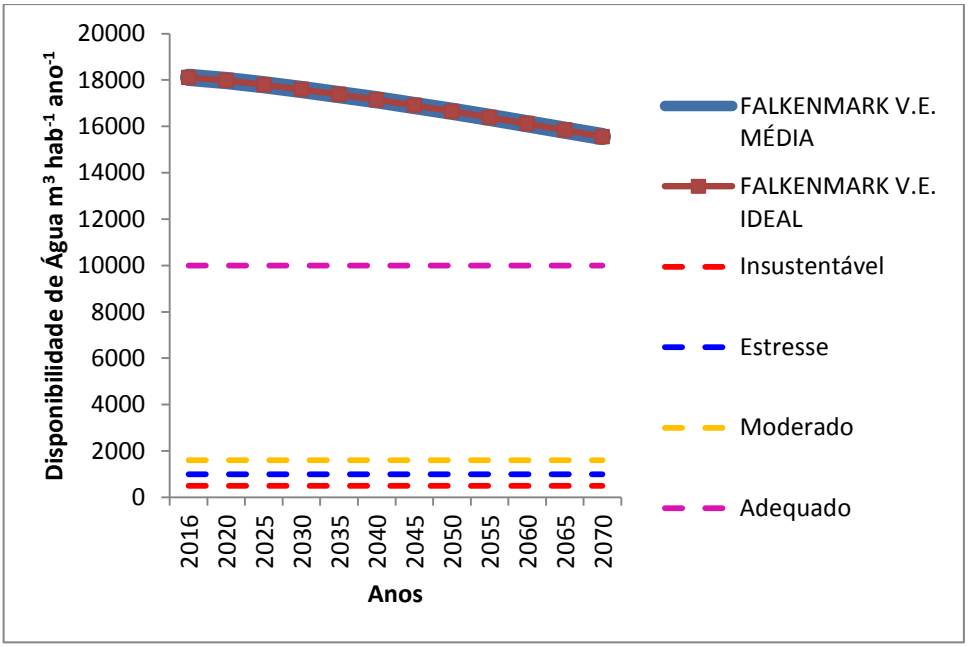
Legenda: IS=Índice de Sustentabilidade; IS Crítico= índice menor que 0,2 equivale à estresse hídrico e vulnerabilidade no uso dos recursos hídricos.
Fonte: Resultados da investigação.

d) Cenário BaU.5: *Business as Usual* com Vazão Ecológica Média = 102 m^3S^{-1} e Vazão Ecológica Ideal=153 m^3S^{-1}

O cenário BaU.5 incorpora variações na Vazão Ecológica de acordo com o proposto na metodologia de Tennant (MOHARD, 1986). Na simulação, foram utilizadas a Vazão Ecológica Média, que corresponde a 102 $m^3 s^{-1}$ ou 40% da vazão media de longo prazo, e a Vazão Ecológica Ideal de 153 $m^3 s^{-1}$ que equivale a 60% da vazão média de longo prazo.

Nas simulações efetuadas para esse cenário, o Índice de Falkenmark não experimenta variações ao considerar-se as duas diferentes Vazões Ecológicas, mantendo os mesmos níveis da quantidade de água disponível para a população que no cenário BaU.1. Em 2016, início do período de simulação, a disponibilidade de água para a população era de 18.111 m^3 hab^{-1} ano^{-1} e no final do período, em 2070, essa disponibilidade foi reduzida para 15.559 m^3 hab^{-1} ano^{-1} (Figura 23). Ambos valores econtram-se acima de 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}, o que indica que nesse cenário a BH do ALPA apresenta dotação de água adequada para suprir as necessidades da população.

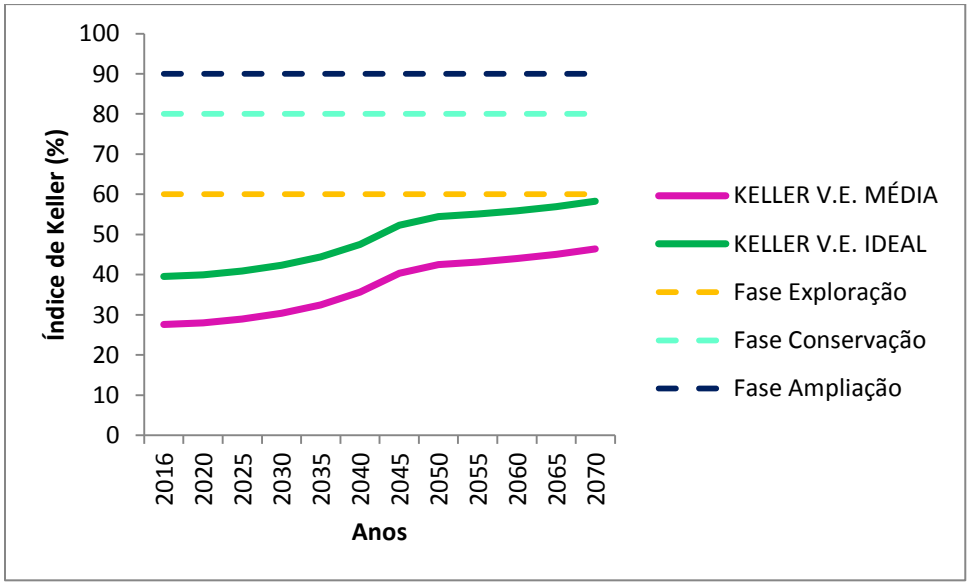
Figura 23 – Índice de Falkenmark BaU.5



Legenda: Falkenmark V.E. Média = Índice de Falkenmark com Vazão Ecológica Média; Falkenmark V.E. Ideal = Índice de Falkenmark com Vazão Ecológica Ideal; Insustentável= menor que 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Estresse= no intervalo de 500 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Moderado= no intervalo de 1.600 a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Adequado= maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.
Fonte: Resultados da investigação.

A Figura 24 apresenta o Índice de Keller considerando a Vazão Ecológica Média e a Vazão Ecológica Ideal. Segundo esse índice, a BH do ALPA encontra-se em 2016, na Fase de Exporação, estágio I, no caso de utilizar a Vazão Ecológica Média, o que significa que o sistema de recursos hídricos da bacia é amplamente aberto, usando 28% da água disponível. Esta situação muda a partir de 2045, quando passa para o estágio II de exploração, com 40% da água disponível na bacia sendo utilizada, o que se mantém até 2070, final do periodo de simulação. No estágio II se faz necessária a construção de sistemas de armazenamento, ampliando o sistema de distribuição e bombeamento a partir de aquíferos profundos.

Figura 24 – Índice de Keller BaU.5



Legenda: Keller V.E. Média = Índice de Keller com Vazão Ecológica Média; Keller V.E. Ideal = Índice de Keller com Vazão Ecológica Ideal; Fase Exploração= a bacia usa até 60% da água (estágio I: a bacia usa menos que 40% da água, estágio II: a bacia usa 40 a 60% da água); Fase Conservação= a bacia usa de 60 a 80% da água; Fase Ampliação= a bacia usa mais de 90% da água.
Fonte: Resultados da investigação.

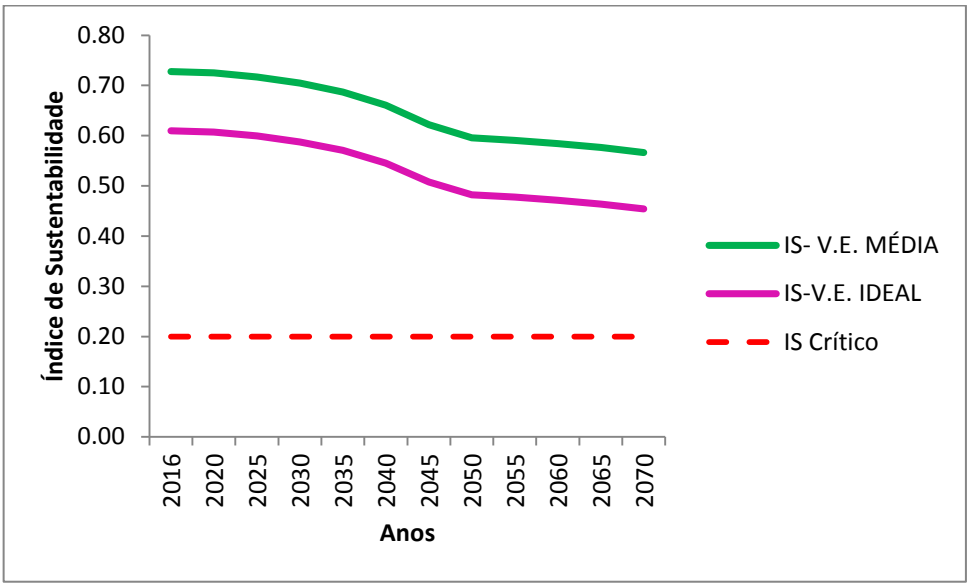
Durante o período de simulação com a Vazão Ecológica Ideal, a BH do ALPA começa no estágio II da Fase de Exploração, em 2016, usando 40% da água disponível e termina no límite da Fase de Exploração, quase entrando na Fase de Conservação, estágio III, com 58% da água disponível na bacia sendo utilizada (Figura 24). Isso indica que já se torna importante o uso eficiente dos recursos hídricos e reduções na demanda. Segundo Keller, Keller e Davids (1998), a conservação dos suprimentos de água doce disponíveis torna-se cada vez mais importante quando o abastecimento de água não é mais adequado (na totalidade ou em partes da bacia) durante os períodos de vazões mínimas. O uso da Vazão Ecológica Ideal significa um aumento de 45% de uso da água na bacia em relação à Vazão Ecológica Média e um incremento de 250% relativo à Vazão Ecológica Mínima.

Incluir vazões ecológicas é importante para avaliar de forma adequada a sustentabilidade do sistema de recursos hídricos em bacias hidrográficas, pois se trata de uma variável chave para o planejamento e gestão, muitas vezes ignorada dentro dos planos de bacia. Existem ainda muitas divergências no âmbito acadêmico em relação à metodologia para se determinar uma vazão ecológica, e dentro dos

comitês de bacia tem-se muitas discussões. No entanto, é possivel por meio das simulações, ver o impacto que diferentes vazões ecológicas trazem para à sustentabilidade do sistema, fator que pode ajudar no adequado planejamento dos recursos hidricos e na tomada de decisões dos diferentes usuários.

O Índice de Sustentabilidade (Figura 25) era de 0,73 em 2016, chegará a 0,60 em 2050 e a 0,57 em 2070, quando se utilizou a Vazão Ecológica Média. No caso de usar a Vazão Ecológica Ideal, o IS em 2016 era de 0,61, vai a 0,48 em 2050 e será de 0,45 em 2070. Segundo esse indicador, o sistema funciona de forma sustentável em ambas as situações, mas no caso da Vazão Ecológica Ideal aproxima-se do limite de 0,2, que indicaria que o sistema entraria em uma situação de estresse.

Figura 25 – Índice de Sustentabilidade – IS BaU.5



Legenda: IS-V.E. Média = Índice de Sustentabilidade com Vazão Ecológica Média; IS- V.E. Ideal = Índice de Sustentabilidade com Vazão Ecológica Ideal; IS Crítico= índice menor que 0,2 equivale à estresse hídrico e vulnerabilidade no uso dos recursos hídricos.
Fonte: Resultados da investigação.

4.4.2 Resultados Cenários Mudanças Climáticas

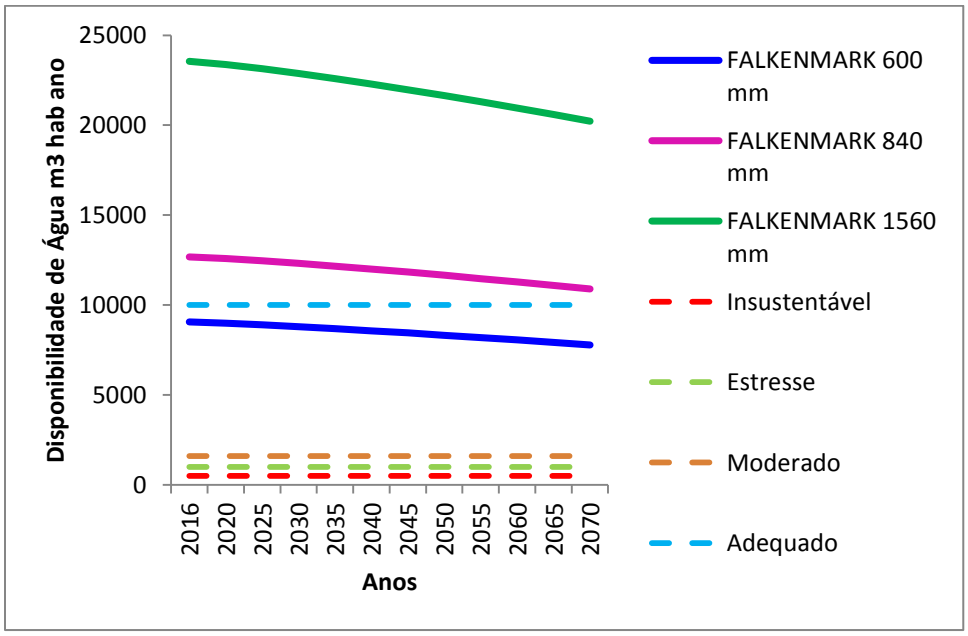
Estes cenários incorporaram reduções e incrementos na precipitação média estimada na BH do ALPA, induzidas pelas mudanças climáticas globais. Um estudo recente de Alvares, Sentelhas e Dias (2022), feito para a Região Sudeste do Brasil, indica um aumento de temperatura de 0,9°C decorrente das mudanças climáticas. Esse fator está mudando o clima da região de subtropical para tropical de acordo

com a classificação de Köppen. É de se esperar que a variação do clima tenha impactos também no padrão das precipitações; devido a isso, formulou-se nesta pesquisa diferentes cenários embasados na variação das precipitações, conforme apresentado neste item, considerando, tanto possíveis reduções como incrementos nesta variável, considerada chave dentro do modelo desenvolvido.

a) Cenário MC.1: Mudança Climática com Variação na Precipitação Média. Precipitação Média de 600 mm ano^{-1}, de 840 mm ano^{-1} e de 1.560 mm ano^{-1}.

A Figura 26 apresenta o Índice de Falkenmark para o periodo de 2016 a 2070, quando se tem uma redução de 50% na precipitação média (600 mm ano^{-1}). Esse índice, que indica a quantidade de água disponível por habitante, reflete que a bacia tem problemas moderados de água, posto que oscila entre 7.779 e 9.056 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. No caso de redução da precipitação média em 30% (840 mm ano^{-1}) ou aumento da precipitação média em 30% (1.560 mm ano^{-1}), a bacia tem uma dotação adequada de água, pois o índice será maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.

Figura 26 – Índice de Falkenmark MC.1

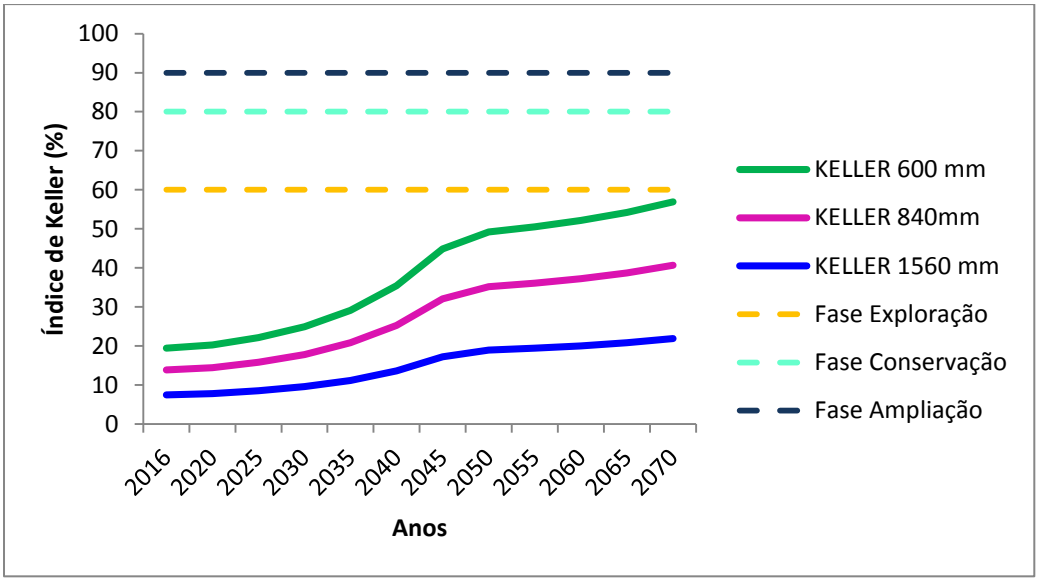


Legenda: Falkenmark 600mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 600 mm; Falkenmark 840mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 840 mm; Falkenmark 1560mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 1.560 mm; Insustentável= menor que 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Estresse= no intervalo de 500 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Moderado= no intervalo de 1.600 a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Adequado= maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.
Fonte: Resultados da investigação.

O Índice de Falkenmark, calculado usando o MGBALPA, corresponde às projeções do plano de bacia 2016/2027 e ao Relatório de situação dos recursos hídricos da BH do ALPA, que indicam que existe uma dotação adequada de água (CBH-ALPA, 2016, 2020). Esta situação é explicada pelo fato de que a BH do ALPA tem baixa população, considerando que sua área territorial é de 22.734 Km^2 e que cresce a uma taxa muito reduzida de 0,5% anual, inferior à taxa média do estado de São Paulo, que é de 1,6% (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE, 2012).

A Figura 27 apresenta o Índice de Keller considerando variações na precipitação média. Segundo esse Índice, a BH do ALPA encontra-se em 2016, na Fase de Exporação, estágio I, considerando na simulação precipitações médias de 600, 800 e 1.560 mm ano^{-1} e utilizando 19, 14, e 7% da água disponível na bacia. Em 2050, quando se considera a precipitação média de 600 mm ano^{-1}, a bacia passa para o estágio II da Fase de Exploração, usando 49% da água disponível. Nesse mesmo ano, quando se utiliza as precipitações médias de 840 e 1.560 mm ano^{-1}, a bacia mantém-se dentro da Fase de exploração no estágio I, usando 35 e 19% da água disponível, respectivamente. Em 2070, quando se adota a precipitação média de 600 mm ano^{-1}, a bacia está no limite do estágio II, usando 57% da água disponível, quase entrando na Fase de Conservação, estágio III. No caso da precipitação média de 840 mm ano^{-1}, a bacia entra no estágio II da Fase de exploração, utilizando 41% da água. Quando se considera a precipitação média de 1.560 mm ano^{-1}, a BH do ALPA usa 22% da água, o que indica que, em relação ao desenvolvimento da bacia, essa se encontra-se no estágio I da Fase de Exploração.

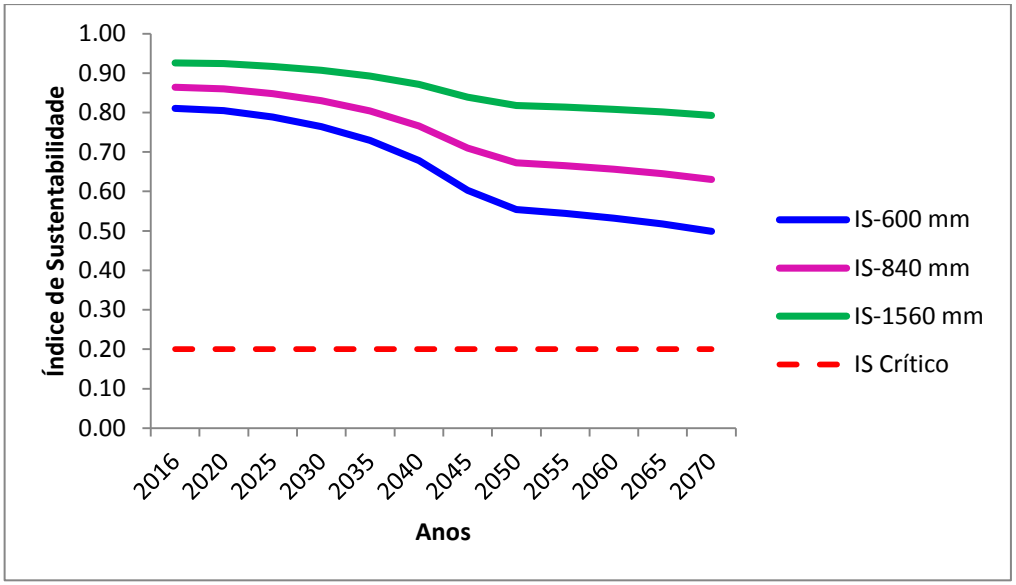
Figura 27 – Índice de Keller MC.1



Legenda: Keller 600mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 600 mm; Keller 840mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 840 mm; Keller 1560mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 1.560 mm; Fase Exploração= a bacia usa até 60% da água (estágio I: a bacia usa menos que 40% da água, estágio II: a bacia usa 40 a 60% da água); Fase Conservação= a bacia usa de 60 a 80% da água; Fase Ampliação= a bacia usa mais de 90% da água.
Fonte: Resultados da investigação.

Como pode ser observado na Figura 28, para os diferentes níveis de variação das precipitações, o valor do IS foi superior a 0,2 em todos os casos. Isto indica um baixo ou nenhum estresse na oferta de água, o que significa que a demanda de água é menor ou igual a 80% da oferta potencial desse recurso. Pode-se afirmar que, havendo variações nas precipitações e em especial reduções nas mesmas, o sistema apresenta condições de sustentabilidade no uso dos recursos hídricos quando se analisa o impacto desta variável de forma isolada.

Figura 28 – Índice de Sustentabilidade – IS MC.1



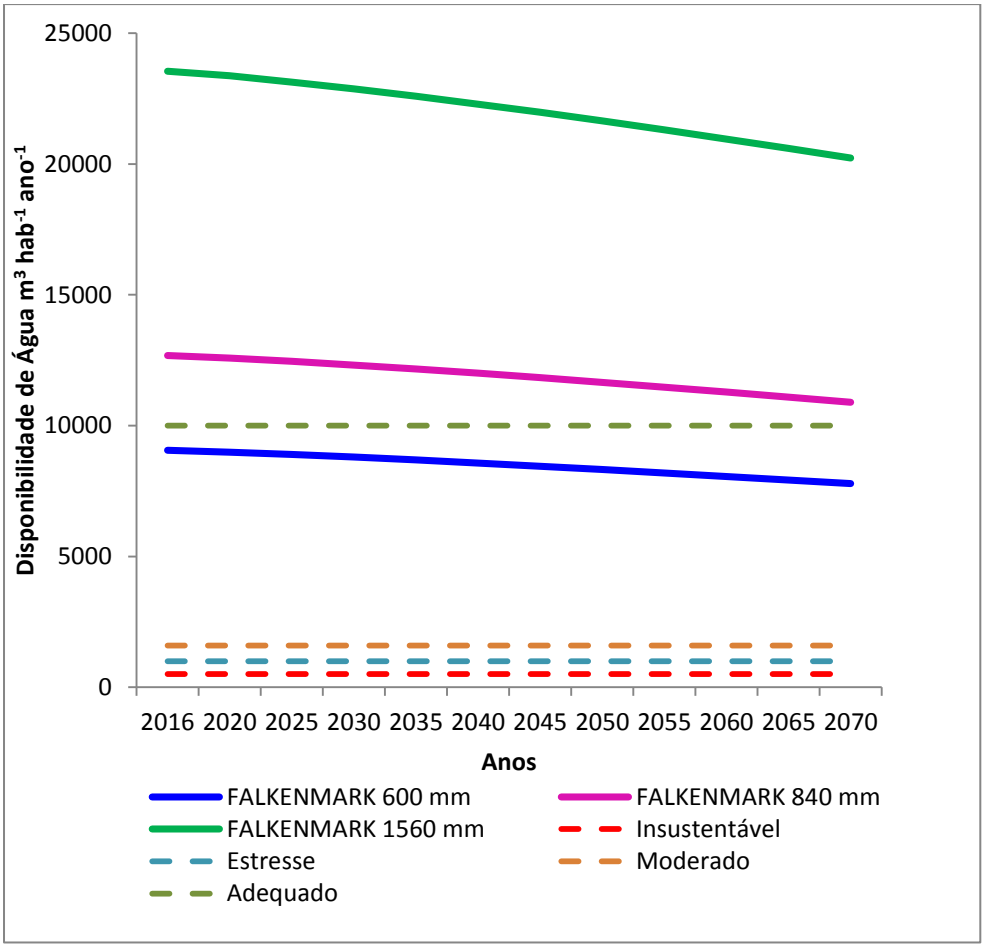
Legenda: IS-600mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 600 mm; IS-840mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 840 mm; IS-1560 mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 1.560 mm; IS Crítico= índice menor que 0,2 equivale à estresse hídrico e vulnerabilidade no uso dos recursos hídricos.
Fonte: Resultados da investigação.

b) Cenário MC.2: Cenário combinado, Precipitação Média de 600, 840 e 1.560 mm ano^{-1} + Incremento de 100% na Taxa de Crescimento das Terras Irrigadas + Vazão Ecológica Ideal = 153 m^{3}s^{-1}

O cenário combinado inclui variações nas precipitações, na taxa de crescimento das terras irrigadas e na vazão ecológica, gerando resultados que indicam impactos na sustentabilidade do sistema de recursos hídricos na BH do ALPA a médio e longo prazo.

O Índice de Falkenmark, Figura 29, quando se tem precipitação média de 600 mm ano^{-1}, taxa de crescimento das terras irrigadas de 18% e Vazão Ecológica Ideal de 153 m^{3}s^{-1}, indica que durante todo o periodo de simulação, de 2016 a 2070, a BH do ALPA vai enfrentar problemas moderados de disponibilidade de água, pois o índice oscila entre aproxidamente 8.000 e 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}. Quando se tem precipitação média de 840 ou 1.560 mm ano^{-1}, taxa de crescimento das terras irrigadas de 18% e Vazão Ecológica Ideal de 153 m^{3}S^{-1}, a situação da disponibilidade de água pode ser considerada adequada de acordo com esse índice, pois é maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1} durante todo o periodo de simulação.

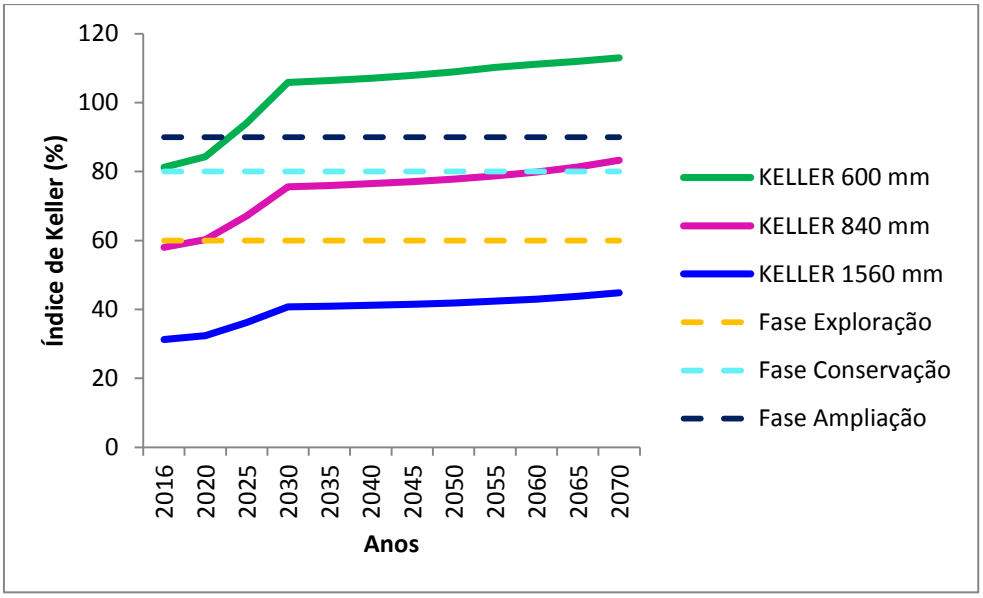
Figura 29 – Índice de Falkenmark MC.2



Legenda: Falkenmark 600mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 600 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Falkenmark 840mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 840 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Falkenmark 1560mm= Índice de Falkenmark com Precipitação Média de 1.560 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Insustentável= menor que 500 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Estresse= no intervalo de 500 a 1.600 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Moderado= no intervalo de 1.600 a 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}; Adequado= maior que 10.000 m^3 hab^{-1} ano^{-1}.
Fonte: Resultados da investigação.

A Figura 30 apresenta o Índice de Keller considerando variações na precipitação média, na taxa de crescimento das terras irrigadas e no uso da Vazão Ecológica Ideal. Segundo esse índice, a BH do ALPA encontra-se em 2016, na Fase de Conservação, estágio IV (para precipitação média de 600 mm ano^{-1}, taxa crescimento das terras de 18% e Vazão Ecológica Ideal), usando 81% da água disponível na bacia. A partir de 2030, a BH do ALPA entra na última Fase de desenvolvimento de uma bacia, a Fase de Ampliação, estágio VI, usando 106% da água disponível e assim permanece até o final do periodo de simulação, em 2070.

Figura 30 – Índice de Keller MC.2



Legenda: Keller 600mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 600 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Keller 840 mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 840 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Keller 1560mm = Índice de Keller com Precipitação Média de 1.560 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; Fase Exploração= a bacia usa até 60% da água (estágio I: a bacia usa menos que 40% da água, estágio II: a bacia usa 40 a 60% da água); Fase Conservação= a bacia usa de 60 a 80% da água; Fase Ampliação= a bacia usa mais de 90% da água.
Fonte: Resultados da investigação.

À medida que o abastecimento de água disponível em uma bacia se aproxima do seu pleno desenvolvimento, existe maior dependência da reutilização dos fluxos de retorno resultantes de cada ciclo de uso, e o sistema começa a fechar. Para tais sistemas de fechamento de água, a típica falta de preocupação em reduzir a demanda, em controlar a salinidade e a poluição para conservar o abastecimento de água doce deve mudar. Isto porque há uma maior dependência da reutilização dos fluxos de retorno, mas a carga crescente de poluentes e salinidade não pode mais ser adequadamente diluída, portanto, a água se torna imprópria para reutilização e os custos de tratamento aumentam. Na fase final de desenvolvimento do sistema de recursos hídricos da bacia, a exploração adicional não é mais uma opção viável e o foco de desenvolvimento deve passar da exploração para a conservação. Outras medidas devem ser adotadas para diminuir a demanda e fazer um uso mais eficente da água.

Quando se considera, em 2016, uma a precipitação média de 840 mm ano^{-1}, taxa de crescimento de 18% e Vazão Ecológica Ideal, utiliza-se 58% da água

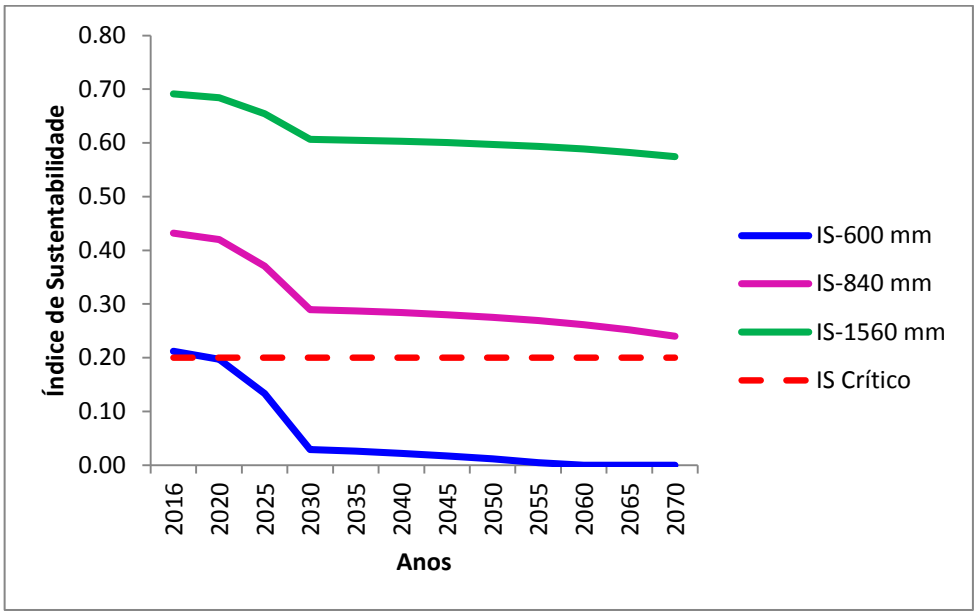
disponível, o que coloca a bacia hidrográfica no estágio II da Fase de exploração, sendo necessária a construção de sistemas de armazenamento para ampliar a distribuição, e bombeamento a partir de aquíferos profundos. A partir de 2020 até 2060, a bacia entra na Fase de Conservação, estágio III, usando até 80% da água disponível. De 2060 até o final da simulação, a bacia se enquadra no estágio IV da Fase de Conservação, usando mais de 80% da água doce. Nessa Fase, tem sido muito utilizada a construção de reservatórios para aumentar a oferta utilizável e a construção de instalações de transferência entre bacias, sendo pouco consideradas as políticas de redução da demanda e o uso eficente da água.

Utilizando a precipitação média de 1.560 mm ano^{-1}, taxa de crescimento de 18% e a Vazão Ecológica Ideal, a BH do ALPA durante todo o periodo de simulação, de 2016 até 2070, mantém-se dentro da Fase de Exploração, sendo que até 2030, encontra-se no estágio I, utilizando até 40% da água disponível e, a partir de 2030 até 2070, a bacia entra no estágio II. Na Fase de Exploração, se considera que a bacia é um sistema amplamente aberto, sendo que o principal meio para satisfazer a crescente demanda é simplesmente desviar mais suprimento e bombear de aquíferos de águas subterrâneas rasas. Há pouca necessidade de se preocupar em aumentar o armazenamento ou conservação para reduzir a demanda ou procedimentos de maior custo, como o tratamento extensivo de águas residuais ou dessalinização para aumentar a oferta utilizável. Essa é a Fase em que há desvio direto de superfície para a exploração de um recurso hídrico, durante a qual há uma ênfase mínima na redução da demanda.

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para o Índice de Sustentabilidade, que indica se a oferta de água disponível consegue suprir de forma sustentável as demandas dos difirentes usuários na BH do ALPA. Quando se utiliza uma precipitação média de 600 mm ano^{-1}, taxa de crescimento das terras de 18% e Vazão Ecológica Ideal, observa-se que desde o início do período de simulação em 2016, o índice reflete situação de estresse hídrico. Segundo Xu *et al*. (2002), valores de IS menores que 0,2 refletem condições de vulnerabilidade, o que indica que a demanda de água é maior que 80% da oferta potencial de água. De 2025 a 2070, o índice alcança valor zero. Um IS igual a zero indica que a oferta de água é insustentável, ou seja, a demanda de água é maior que toda a disponibilidade de recursos hídricos no local. Nesta situação se faz necessária a tomada de decisão

visando um adequado planejamento dos recursos hídricos da bacia, pois se enfrentará escassez e a sustentabilidade do sistema será afetada.

Figura 31 – Índice de Sustentabilidade – IS MC.2



Legenda: IS-600mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 600 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; IS-840mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 840 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; IS-1560mm = Índice de Sustentabilidade com Precipitação Média de 1.560 mm, Tx. Cresc. Terras 18% e V.E. Ideal; IS Crítico= índice menor que 0,2 equivale à estresse hídrico e vulnerabilidade no uso dos recursos hídricos.
Fonte: Resultados da investigação.

Na situação de utilizar a precipitação média de 840 mm ano^{-1}, taxa de crescimento das terras de 18% e Vazão Ecológica Ideal, o IS indica que no período de 2016 até 2025, a oferta de recursos hídricos da bacia é adequada para satisfazer as demandas dos usuários. A partir de 2030 até 2070, o IS alcança um patamar de 0,2, indicando que a oferta de água disponível não é adequada e o sistema começa a entrar em estresse (Figura 31). Isso requer a implementação de medidas para o uso eficente da água na bacia, à semelhança da situação anterior.

Quando a precipitação média é de 1.560 mm ano^{-1}, com taxa de crescimento das terras irrigadas de 18% e Vazão Ecológica Ideal, o IS é maior que 0,2 ao longo de todo o período de simulação, de 2016 a 2070 (Figura 31). Valores do IS superiores a 0,2 indicam um baixo ou nenhum estresse na oferta de água, o que significa que a demanda de água é menor ou igual a 80% da oferta potencial desse recurso.

Diferentes estudos realizados em bacias hidrográficas, que utilizaram modelos de simulação e índices para avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos em condições de mudanças climáticas, mostram resultados similares aos observados nesta pesquisa quando se formulam cenários integrados.

Xu *et al*. (2002) simularam o Índice de Sustentabilidade, usando STELLA, para uma sub-região da bacia do Rio Amarelo na China. Considerando cenários de variações nas áreas irrigadas, os valores de Índice de Sustentabilidade de 0,29, 0,18 e 0,11 para os anos 2010, 2020 e 2030, respectivamente, evidenciando que a bacia mostra situação de estresse hídrico, o que pode ser reforçado pela mudança climática.

Orellana González *et al*. (2008), em um estudo no município de São Miguel do Anta (MG), avaliaram a sustentabilidade dos recursos hídricos no município com base no Índice de Sustentabilidade, mostrando que no período de simulação de 2003 a 2035, no cenário integrado de mudança climática e incremento nas áreas irrigadas, o IS se aproxima de 0,2, entrando em estresse o sistema de recursos hídricos no município.

Em estudo feito por Sánchez-Román, Folegatti e Orellana-González (2010) nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundíai, os resultados encontrados para os Índices de Falkenmark, Keller e Sustentabilidade mostraram que, a partir de 2030, as bacias estarão em situação de grande vulnerabilidade, insustentabilidade e estresse hídrico, podendo entrar em condições de estresse crônico de escassez de água.

Souza *et al*. (2010) analisaram o comportamento hidrológico na bacia do córrego Entre Ribeiros utilizando o *software* STELLA. No cenário de mudança climática, que compreende variações de precipitação e temperatura, encontraram índices de sustentabilidade indicando que em 2040 a bacia entrará em estresse hídrico ao alcançar o IS de 0,2.

Ribeiro *et al*. (2022), considerando diferentes cenários de mudanças climáticas na bacia do rio Palma, Tocantins, avaliaram com base no Índice de Sustentabilidade, a situação da água da bacia até o final do século XXI. Os resultados encontrados indicam que durante todo o período de simulação é possivel observar uma redução da oferta de água e por outro lado aumentos em sua demanda. Ao final do periodo de simulação, o Índice de Sustentabilidade foi inferior a 0,2, indicando a insustentabilidade dos recursos hídricos da bacia.

5 CONCLUSÕES

O MGBALPA é um modelo de caráter preditivo, baseado em processos, que possibilita por meio de simulações do balanço hídrico, a formulação de diferentes cenários, proporcionando informações quantitativas sobre o que aconteceria com a oferta e demanda de recursos hídricos na BH do ALPA. O desenvolvimento e exploração do modelo permitiram alcançar os objetivos propostos na presente pesquisa.

A metodología utilizada permite avaliar de forma sistêmica a relação clima-bacias-água, possibilitando expandir nossa visão além da tradicional "gestão integrada dos recursos hídricos" ao considerarmos todo o ciclo hidrológico. Isto significa alcançar e contribuir para agendas maiores, incluindo a gestão de risco de desastres, projetos de paisagens sustentáveis, iniciativas voltadas ao desenvolvimento de cidades resilientes e à uma agricultura climáticamente inteligente, pois a água é o grande conector dessas agendas.

Nos cenários BaU que não incorporam mudanças nas precipitações médias derivadas da mudança climática, os três índices avaliados indicam que existe na BH do ALPA uma oferta adequada de água que permite satisfazer a demanda da população (Índice de Falkenmark). Quanto ao uso de água, o Índice de Keller mostra que dentro das fases de desenvolvimento, a bacia do ALPA está na Fase de Exploração, estágio I e II, usando até 60% da água disponível, sendo considerada uma bacia aberta, não havendo necessidade de implementação de políticas de redução da demanda, mas recomenda-se um planejamento do uso dos recursos hídricos. Por outro lado, segundo o Índice de Sustentabilidade, o sistema de recursos hídricos da bacia não apresenta situações de estresse ou vulnerabilidade. A oferta de água disponível pode suplir a demanda dos diferentes usuários, mantendo a sustentabilidade (a demanda é menor que 80% da oferta de água disponível na bacia).

Os resultados dos cenários que incorporam variações na precipitação média decorrentes das mudanças climáticas, indicam que no caso de redução de 50% na precipitação média (600 mm ano^{-1}), a bacia terá problemas moderados de água, de acordo com o Índice de Falkenmark. No caso de redução da precipitação média em 30% (840 mm ano^{-1}) ou aumento da precipitação média em 30% (1.560 mm ano^{-1}), a bacia terá uma dotação adequada de água. Para os diferentes níveis de variação

das precipitações, o valor do IS em todos os casos foi superior a 0,2, indicando que o sistema funciona sem estresse.

Os resultados do cenário combinado, que incorpora além de variações na precipitações, alterações na taxa de crescimento das terras irrigadas e na Vazão Ecológica, mostram, de forma geral, uma deterioração nos três índices, indicando que essas variações combinadas afetam a disponibilidade de água para a população, tornando a bacia do ALPA um sistema fechado, sendo importante tomar medidas para diminuição da demanda, uso e planejamento eficiente dos recursos hídricos e reúso das águas residuais. Mesmo assim, o Índice de Sustentabilidade alcança valor zero, indicando uma sobre-explotação da oferta de água disponível.

É necessario destacar que no cenário combinado, a incorporação da Vazão Ecológica Ideal impacta de forma importante a sustentabilidade do sistema, o que demostra o papel relevante que tem este parametro nas análises do balanço hídrico em bacias hidrográficas. A pesquisa desenvolvida mostra a necessidade de incorporação da vazão ecológica nas análises sobre recursos hídricos a fim de melhorar as previsões que podem ser feitas sobre o comportamento da oferta e demanda de água num determinado local e os impactos que as mudanças climáticas podem ter sobre essas variáveis.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO-ANA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil** – 2014: relatório síntese. Brasília, DF: ANA, 2016.

ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C.; DIAS, H. B. Southeastern Brazil inland tropicalization: Köppen system applied for detecting climate change throughout 100 years of meteorological observed data. **Theoretical And Applied Climatology**, Austria, v. 149, n. 3-4, p. 1431-1450, 22 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00704-022-04122-4.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L. M.; FERNANDEZ, J. P. R. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI:** Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, Cambridge, v. 12, n. 3, p. 183-210, 1996. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1099-1727(199623)12:33.0.co;2-4.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior-MDIC. **AGROSTAT- Estatísticas do Comercio Exterior do Agronegócio Brasileiro**. 2021. Disponível em: https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html. Acesso em: 13 abr. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Enfoque Ecossistêmico Aplicado à gestão dos recursos hídricos:** Vazão Ecológica e Vazão Ambiental. Brasília, 2010. Reunião da Câmara Técnica de Controle e Qualidade Ambiental/ CONAMA. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1306/Apresentacao_Vazao+ecológica+vazao+ambiental.pdf. Acesso em: 13 fev. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2016.

CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA - CETEC. **Plano de bacia hidrográfica do alto Paranapanema 2012/2015**. Lins, 2015. Disponível em: http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/8776/planodebaciacbhalpa.pdf. Acesso em: 05 out. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA – CBH-ALPA. **Plano de Bacia do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema para o período de 2012/2015**, Piraju, 2011. Disponível em: http://www.comitealpa.com/pdf/planodebaciacbhalpa.pdf. Acesso em: 28 abr. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA – CBH-ALPA. **Plano de Bacia do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema para o período de 2016/2027**, Piraju, 2016. Disponível em: http://www.comitealpa.com/pdf/planodebaciacbhalpa.pdf. Acesso em: 23 jan. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA – CBH-ALPA. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI-14 – Alto Paranapanema – 2020 – Ano Base 2019**.Piraju, 2020. Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBHALPA/12213/relatorio-de-situacao-2017_v_final.pdf. Acesso em: 22 jan. 2022.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA – CBH-ALPA. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI-14 – Alto Paranapanema – 2017 – Ano Base 2016**, Piraju, 2017. Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-ALPA/12213/relatorio-de-situacao-2017_v_final.pdf. Acesso em: 20 jan. 2022.

COX, P. M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; JONES, C. D.; JUPP, T. E.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, United Kingdom, v. 453, n. 7192, p. 212-215, maio 2008. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1038/nature06960.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA- DAEE. **UGRHI 14-Alto Paranapanema Postos Pluviométricos**. Disponível em: http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/CTH.Mapas/ugrhi_14/ugrhi_14_plu.html. Acesso em: 01 nov. 2021.

DUVOISIN, I.A. **Uma proposta metodológica para o ensino de equações diferenciais utilizando STELLA**. Porto Alegre: Fundação Universidade Federal do Rio Grande/Revista eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, 2000. 13 p.

EHRMANN, J. R. **The policy dialogue:** A descriptive model of a new approach to formulating environmental policy. 1997. Tese (Ph.D. in Natural Resources and Environment)- University of Michigan, Michigan, 1997.

FALKENMARK, M., BERNTELL, A., JÄGERSKOG, A., LUNDQVIST, J., MATZ, M., TROPP, H. **On the Verge of a New Scarcity:** A Call for Good Governance and Human Ingenuity. Sundbyberg: Stockholm International Water Institute (SIWI) Policy Brief, 2007.

FALKENMARK, M. The Massive Water Scarcity now threatening Africa - Why isn‘t it being addressed? **Ambio**, Estocolmo, v. 18, n. 2, p. 112-118, 1989.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. CropWat. Disponível em: https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/. Accesso em: 28 abr. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **The State of Food and Agriculture:** Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
FORD, A. **Modeling the environment**: an introduction to system dynamics modeling of environmental systems. Washington: Island Press, 1999. 401 p.

FORRESTER, J.W. **Industrial dynamics**. Portland: Productivity Press, 1961. 464 p.

FORRESTER, J.W. **World dynamics**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971. 142 p.

FORRESTER, J.W. Information sources for modeling the national economy. **Journal of the American Statistical Association**, New York, v. 75, n. 371, p. 555-566, 1980.

GLEICK, P.H. **Water in crisis**. New York: Oxford University Press, 1993. 420 p.

GLEICK, P.H. **The world's water 1998-1999**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 1998. 180 p.

GLEICK, P.H. **The world's water 2000-2001**: the biennial report on freshwater resources. Washington: Island Press, 2000. 170p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Plano para instalação e uso sustentável de açudes em empreendimentos agrícolas na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, SP**. Relatório Técnico nº 112.082-205. São Paulo, 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES – IPCC, 2007. **Climate Change 2007:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf. Acesso em: 23 abr. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES - IPCC, 2014: **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [CORE WRITING TEAM, R.K. PACHAURI AND L.A. MEYER (Ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. Disponível em: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf. Acesso em: 23 abr. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES-IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis,

M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/. Acesso em: 10 abr. 2022.

KELLER, J.; KELLER, A.; DAVIDS, G. River basin development phases and implications of closure. **Journal of Applied Irrigation Science**, Germany, v. 33, n. 2, p. 145-163, 1998.

MANSUR, A. E; ASSAD, E.: "É impossível dizer quando a seca acabará". [S.l.]: Blog doPlaneta, 2015. Disponível em: http://epoca.globo.com/colunas-e-blogs/blog-do-planeta/noticia/2015/02/beduardo-assadb-e-impossivel-dizer-quando-seca-acabara.html. Acesso em: 20 abr. 2022**.**

MARENGO, J. A.; DIAS, P. S. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Ed.) **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, 2006. p.63-109.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade** – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. v.1, p.214.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, v.103, p.25-32, 2014.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C.; ROCHA, R., P. da; LABORBE, R**. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI:** Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, fevereiro 2007.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S. de; OLIVEIRA, R. de; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, Boston, v. 21, n. 3, p. 495-516, 1 fev. 2008a. American Meteorological Society. http://dx.doi.org/10.1175/2007jcli1600.1.

MARENGO, J.A; NOBRE, C.A; TOMASELLA, J; CARDOSO, M.F; OYAMA, M.D. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**: Biological Sciences, United Kingdom, v. 363, n. 1498, p. 1773-1778, 12 fev. 2008b. The Royal Society. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.0015.

MATOS, A.T. **Manejo e tratamento de resíduos agroindustriais I**. Viçosa: UFV, 2003. 153 p. (Apostila do curso).

MEADOWS, D. L.; BEHRENS, W. W. III; MEADOWS, D. H.; NAIL, R. F.; RANDERS, J.; ZAHN, E. K.O. **Dynamics of growth in a finite world**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1974. 670 p.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J. **Beyond the limits:** confronting global collapse, envisioning a sustainable future. Post Mills, Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 1992. 300 p.

MOHARD, J.E. **Instream Flow Methodologies.** Lafayette: Electric Power Research Institute. Inc.- EA Engineering Science and Technology. Inc., 1986. 336 p.

NARDELLI, A.M.B.; GRIFFITH, J.J. **Introdução ao sistema de gestão ambiental**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Núcleo de Gestão Integrada, 2000. 60 p. (Apostila de curso).

NEELAMKAVIL, F. **Computer simulation and modeling**. New York: John Wiley, 1987. 589 p.

OLIVA, F. G. Climatologia e variabilidade dos principais sistemas meteorológicos atuantes no brasil, relação com chuvas intensas e impactos relacionados. **GeoPUC – Revista da Pós-Graduação em Geografia da PUC-Rio**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 23, p. 74-99, jul.-dez. 2019.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G; SILVA-JUNIOR, A. G. da; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, E.; BRAGA, J. L. Water resources sustainability at são miguel do anta county, minas gerais, Brazil: a system dynamics approach. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, Tupã, v. 2, n. 3, p. 231-241, 15 dez. 2008. Universidade Estadual Paulista - Campus de Tupa. http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2008v2n3p231-241.

RIBEIRO, C. L. C.; DIOTTO, A. V.; THEBALDI, M. S.; RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R. Simulations of the climate change and its effect on water resources in the Palma River basin, Brazil. **Water Supply**, London, v. 22, n. 5, p. 5494-5508, 28 abr. 2022. IWA Publishing. http://dx.doi.org/10.2166/ws.2022.184.

RICHARDSON, G.P. System dynamics: simulation for policy analysis from a feedback perspective. *In*: FISHWICK, P. A.; LUKER, P. A (ed.). **Qualitative simulation modeling and analysis.** New York: Springer Verlag, 1991. p. 144-169. Advances in Simulation-volume 5.

ROBINSON, S. *et al*. **The International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT)**: model description for version 3. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 2015.

ROTMANS, J.; VRIES, B. de (ed.). **Perspectives on Global Change**: the targets approach. United Kingdom: Cambridge University Press, 1997.

SALES, M. A. L. de. **Balanço hídrico na sub-bacia hidrográfica do Boi Branco – SP para gestão sustentável da agricultura irrigada.** 2014. f. 90. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências

Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2014.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. Modelo dos Recursos Hídricos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí: Uma Perspectiva de Dinâmica de Sistemas. *In*: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo, **Anais** [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídrico-ABRHIDRO, 2007. p. 1-14 Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=9865. Acesso em: 4 abr. 2022.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G. Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiaí River Basins: a dynamic systems approach. **Water Resources Management**, New York, v. 24, p. 761-773, 2010.

SCHMIED, H. M. *et al*. The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: model description and evaluation. **Geoscientific Model Development**, Germany, v. 14, n. 2, p. 1037-1079, 23 fev. 2021. Copernicus GmbH. http://dx.doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021.

SENGE, P.M. **A quinta disciplina**: arte e prática da organização que aprende. São Paulo: Best Seller, 1990. 441 p.

SENGE, P.M. **La quinta disciplina**. Madrid: Editorial Granica, 1995. 425 p.

SENGE, P.M. **La quinta disciplina en la práctica**. Madrid: Editorial Granica, 1997. 275 p.

SERVIÇO NACIONAL DE PESQUISAS AGRONÔMICAS. Ministério da Agricultura. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do estado de São Paulo**: contribuição a carta de solos do brasil. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas, 1960. 620 p. (Boletim Nº12). Elaborado pela Comissão de Solos.

SHIKLOMANOV, I. **Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world**. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 1997. 186 p.

SIMONOVIC, S. World water dynamics: global modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, London, n. 6, p. 249-267, 2002.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 1, p. 295-304, 1999.

SIMONOVIC, S.; FAHMY, H.; EL-SHORBAGY, A. The use of object oriented modeling for water resources planning in Egypt. **Water Resources Management**, New York, n. 11, p. 243-261, 1997.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO- SIGRHSP. Disponível em: http://www.sigrh.sp.gov.br. Acesso em: 25 jan. 2022.
SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, M. A. A. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa STELLA dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 1, n. 1, p. 16-42, 6 nov. 2010. Companhia Brasileira de Producao Cientifica. http://dx.doi.org/10.6008/ess2179-6858.2010.001.0002.

STELLA. **Introduction to systems thinking.** NH: High Performance Systems, 2001. 165p.

STERN, N. **Stern Review**: The Economics of Climate Change, United Kingdom, 2006. 267p.

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE-SEI (Estocolmo). **PoleStar**. 2022a. Disponível em: https://www.sei.org/projects-and-tools/projects/polestar/. Acesso em: 24 maio 2022.

STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE-SEI (Estocolmo). **Welcome to WEAP!:** WEAP ("Water Evaluation And Planning" system) is a user-friendly software tool that takes an integrated approach to water resources planning. 2022b. Disponível em: https://www.weap21.org/. Acesso em: 24 maio 2022.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP. **Atlas Geoambiental da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema**. Presidente Prudente, 2018. Disponível em: https://www2.paranapanema.org/wp-content/uploads/2021/04/Atlas-Geoambiental-da-Bacia-Paranapanema-Vers%C3%A3o-Final.pdf. Acesso em: 25 julho 2022.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDARA, H.; ZHANG, X. W. 2002. Sustainability Analysis for Yellow River Water Resources Using the System Dynamics Approach. **Water Resources Management**, v. 16, pp. 239-261.

APÊNDICE A – Código do MGBALPA

Ingresos gerados pela otorga

Ingresos = R$ingXAG+R$ingXInd+R$ingXPop+R$inXPEC

Units: BrazilianReal/years

Sector Oferta de água

BalanHidric(t) = BalanHidric(t - dt) + (OFERTA - Saida_agua_ALPA - Demanda_Total_ALPA) * dt

INIT BalanHidric = OFERTA-Demanda_Total_ALPA

Units: m^3/years

INFLOWS:

OFERTA = VolEscTot+VolInfTot

Units: m^3/years-yr

OUTFLOWS:

Saida_agua_ALPA = BalanHidric

Units: m^3/years-yr

Demanda_Total_ALPA = VolTotalReq_ALPA

Units: m^3/years-yr

VolEscTot(t) = VolEscTot(t - dt) + (Esc - exitVolEscTot) * dt

INIT VolEscTot = VolEsc+VolARetorno

Units: m^3/years

INFLOWS:

Esc = VolEsc+VolARetorno

Units: m^3/years-yr

OUTFLOWS:

exitVolEscTot = VolEscTot

Units: m^3/years-yr

VolInfTot(t) = VolInfTot(t - dt) + (Infilt - exitVolInfTot) * dt

INIT VolInfTot = VolInf

Units: m^3/years

INFLOWS:

Infilt = VolInf

Units: m^3/years^2

OUTFLOWS:

exitVolInfTot = VolInfTot

Units: m^3/years-yr

AreaBH = 22689

Units: km^2

CoefEsc = 0.2985

Units: m^3/km^2-mm

CoefInf = 0.1967

Units: m^3/km^2-mm

IS = BalanHidric/OFERTA

Units: Dimensionless

PrecMedYear = 1200

UsodAgua = 100-(1-(Demanda_Total_ALPA/(VolEsc+VolInf)))*100

Units: Dimensionless

VolEsc = (1000*CoefEsc*(PrecMedYear*FactCompClima)*AreaBH)

Units: m^3/years

VolInf = (CoefInf*((0.001*PrecMedYear)*FactCompClima)*AreaBH)*1000000

Units: m^3/years

WatPerCapAva = ((VolEsc+VolInf)/(PopRur+PopUrb))

Units: m^3/years-habitantes

FactCompClima = GRAPH(TIME)

(2016, 1.00), (2017, 1.00), (2018, 1.00), (2019, 1.00), (2020, 1.00), (2021, 1.00), (2022, 1.00), (2023, 1.00), (2024, 1.00), (2025, 1.00), (2026, 1.00), (2027, 1.00), (2028, 1.00), (2029, 1.00), (2030, 1.00), (2031, 1.00), (2032, 1.00), (2033, 1.00), (2034, 1.00), (2035, 1.00), (2036, 1.00), (2037, 1.00), (2038, 1.00), (2039, 1.00), (2040, 1.00), (2041, 1.00), (2042, 1.00), (2043, 1.00), (2044, 1.00), (2045, 1.00), (2046, 1.00), (2047, 1.00), (2048, 1.00), (2049, 1.00), (2050, 1.00), (2051, 1.00), (2052, 1.00), (2053, 1.00), (2054, 1.00), (2055, 1.00), (2056, 1.00), (2057, 1.00), (2058, 1.00), (2059, 1.00), (2060, 1.00), (2061, 1.00), (2062, 1.00), (2063, 1.00), (2064, 1.00), (2065, 1.00), (2066, 1.00), (2067, 1.00), (2068, 1.00), (2069, 1.00), (2070, 1.00)

Units: Dimensionless

Sector Demanda Agricultura

AreaCult(t) = AreaCult(t - dt) + (IncAreaCult) * dt

INIT AreaCult = 81836

Units: m^3/years

INFLOWS:

IncAreaCult = AreaCult*TxIncAreaCult

Units: m^3/years-yr

DAG(t) = DAG(t - dt) + (DemAG - exitAG) * dt

INIT DAG = DemAG

Units: m^3/years

INFLOWS:

DemAG = VARGag+VCONag

Units: m^3/years-yr

OUTFLOWS:

exitAG = DAG

Units: m^3/years-yr

Area_Max = IF(AreaCult>Area_Max_Cult)THEN(Area_Max_Cult)ELSE(AreaCult)

Area_Max_Cult = 1036910

Units: ha

CfAPRag = (1-CfGARag)

Units: Dimensionless

CfGARag = 0.30

Units: Dimensionless

Cons_med_cultivos = 1400

Units: m3/ha/ano

DBOag = 500

Units: kg/m^3

EquivPop_Ag = Loadag/EquiPop

Units: habitantes

Loadag = (DBOag*365*VARGag)/1000

Units: kg/year

OTOAgric = OTOCult

Units: m^3/years

OTOCult = Cons_med_cultivos*Area_Max

Units: m^3/years

R$Capta = 0.009

Units: BrazilianReal/m^3

R$consAG = .02

R$Contamina = 0.09

Units: BrazilianReal/kilograms

R$ingXAG = (R$consAG*VNECag)+(Loadag*R$Contamina)+(R$Capta*OTOAgric)

Units: BrazilianReal/years

VARGag = CfGARag*VNECag

Units: m^3/years

VCONag = VNECag

Units: m^3/years

VNECag = OTOAgric

Units: m^3/years

TxIncAreaCult = GRAPH(TIME)

(2016, 0.09), (2017, 0.09), (2018, 0.09), (2019, 0.09), (2020, 0.09), (2021, 0.09), (2022, 0.09), (2023, 0.09), (2024, 0.09), (2025, 0.09), (2026, 0.09), (2027, 0.09), (2028, 0.09), (2029, 0.09), (2030, 0.09), (2031, 0.09), (2032, 0.09), (2033, 0.09), (2034, 0.09), (2035, 0.09), (2036, 0.09), (2037, 0.09), (2038, 0.09), (2039, 0.09), (2040, 0.09), (2041, 0.09), (2042, 0.09), (2043, 0.09), (2044, 0.09), (2045, 0.09), (2046, 0.09), (2047, 0.09), (2048, 0.09), (2049, 0.09), (2050, 0.09), (2051, 0.09), (2052, 0.09), (2053, 0.09), (2054, 0.09), (2055, 0.09), (2056, 0.09), (2057, 0.09), (2058, 0.09), (2059, 0.09), (2060, 0.09), (2061, 0.09), (2062, 0.09), (2063, 0.09), (2064, 0.09), (2065, 0.09), (2066, 0.09), (2067, 0.09), (2068, 0.09), (2069, 0.09), (2070, 0.09)

Units: Dimensionless

Sector Demanda Ambiental

DAMB(t) = DAMB(t - dt) + (DemAmb - exitAmb) * dt

INIT DAMB = 25.5*(86400*365)

Units: m^3/years

INFLOWS:

DemAmb = VNECamb

Units: m^3/years-yr

OUTFLOWS:

exitAmb = DAMB

Units: m^3/years-yr

Concentra• ‹o =

((Loadag+Loadamb+LoadPec+Loadpop)*1000)/(VARGag+VARGpec+VARGpop+VNECamb)

Units: kg/year

DBOamb = 5

Units: kg/m^3

Loadamb = (DBOamb*VNECamb)/1000

Units: kg/year

OTORGAamb = QEco*(86400*365)

Units: m^3/years

QEco = 25.5

VNECamb = OTORGAamb

QEcol = GRAPH(TIME)

(2016, 1.60), (2017, 1.60), (2018, 1.60), (2019, 1.60), (2020, 1.60), (2021, 1.60), (2022, 1.60), (2023, 1.60), (2024, 1.60), (2025, 1.60), (2026, 1.60), (2027, 1.60), (2028, 1.60), (2029, 1.60), (2030, 1.60), (2031, 1.60), (2032, 1.60), (2033, 1.60), (2034, 1.60), (2035, 1.60), (2036, 1.60), (2037, 1.60), (2038, 1.60), (2039, 1.60), (2040, 1.60), (2041, 1.60), (2042, 1.60), (2043, 1.60), (2043, 1.60), (2044, 1.60), (2045, 1.60), (2046, 1.60), (2047, 1.60), (2048, 1.60), (2049, 1.60), (2050, 1.60), (2051, 1.60), (2052, 1.60), (2053, 1.60), (2054, 1.60), (2055, 1.60), (2056, 1.60), (2057, 1.60), (2058, 1.60), (2059, 1.60), (2060, 1.60), (2061, 1.60), (2062, 1.60), (2063, 1.60), (2064, 1.60), (2065, 1.60), (2066, 1.60), (2067, 1.60), (2068, 1.60), (2069, 1.60), (2070, 1.60)

Units: m^3/years

DPOP(t) = DPOP(t - dt) + (Dempop - exitPop) * dt

INIT DPOP = Dempop

Units: m^3/years

INFLOWS:

Dempop = (VARGpop+VCONpop)

Units: m^3/years^2

OUTFLOWS:

exitPop = DPOP

Units: m^3/years-yr

PopRur(t) = PopRur(t - dt) + (IncPopRur - MigraPopRur) * dt

INIT PopRur = 131038

Units: habitantes

INFLOWS:

IncPopRur = PopRur*TxIncAnualPop

Units: habitantes/yr

OUTFLOWS:

MigraPopRur = PopRur*TxMigraPopRur

Units: habitantes/yr

PopUrb(t) = PopUrb(t - dt) + (IncPopUrb) * dt

INIT PopUrb = 613391

Units: habitantes

INFLOWS:

IncPopUrb = PopUrb*TxIncAnualPop

Units: habitantes/yr

CfGAR = 0.8

Units: Dimensionless

DBOPobRur = 300

Units: kg/m^3

DBOPobUrb = 300

Units: kg/m^3

Loadpop = ((ETE_Remanesc*365)+(DBOPobRur*VARGPopRur))/1000

Units: kg/year

OTORGApop = (VNECPopRur+VNECPopUrb)

Units: m^3/years

R$ingXPop =

(R$cons*VNECpop)+(Loadpop*R$Contamina)+(OTORGApop*R$Capta)

Units: BrazilianReal/years

VARGpop = VARGPopRur+VARGPopUrb

Units: m^3/years

VARGPopRur = CfGAR*VNECPopRur

Units: m^3/years

VARGPopUrb = CfGAR*VNECPopUrb

Units: m^3/years

VCONpop = VNECpop

Units: m^3/years

VNECpop = OTORGApop

Units: m^3/years

VNECPopRur = PopRur*(TxConsPop*365/1000)

Units: m^3/years

VNECPopUrb = (PopUrb*(TxConsPop*365/1000))/PerdSistAbast

Units: m^3/years

ETE_Remanesc = GRAPH(TIME)

(2016, 11486), (2017, 12276), (2018, 12409), (2019, 12590), (2020, 12796), (2021, 13022), (2022, 13267), (2023, 13509), (2024, 13755), (2025, 13999), (2026, 14247), (2027, 14247), (2028, 14247), (2029, 14247), (2030, 14247), (2031, 14247), (2032, 14247), (2033, 14247), (2034, 14247), (2035, 14247), (2036, 14247), (2037, 14247), (2038, 14247), (2039, 14247), (2040, 14247), (2041, 14247), (2042, 14247), (2043, 14247), (2044, 14247), (2045, 14247), (2046, 14247), (2047, 14247), (2048, 14247), (2049, 14247), (2050, 14247), (2051, 14247), (2052, 14247), (2053, 14247), (2054, 14247), (2055, 14247), (2056, 14247), (2057, 14247), (2058, 14247), (2059, 14247), (2060, 14247), (2061, 14247), (2062, 14247), (2063, 14247), (2064, 14247), (2065, 14247), (2066, 14247), (2067, 14247), (2068, 14247), (2069, 14247), (2070, 14247)

PerdSistAbast = GRAPH(TIME)

(2016, 0.375), (2017, 0.375), (2018, 0.375), (2019, 0.375), (2020, 0.375), (2021, 0.375), (2022, 0.375), (2023, 0.375), (2024, 0.375), (2025, 0.375), (2026, 0.375), (2027, 0.375), (2028, 0.375), (2029, 0.375), (2030, 0.375), (2031, 0.375), (2032, 0.375), (2033, 0.375), (2034, 0.375), (2035, 0.375), (2036, 0.375), (2037, 0.375), (2038, 0.375), (2039, 0.375), (2040, 0.375), (2041, 0.375), (2042, 0.375), (2043, 0.375), (2044, 0.375), (2045, 0.375), (2046, 0.375), (2047, 0.375), (2048, 0.375), (2049, 0.375), (2050, 0.375), (2051, 0.375), (2052, 0.375), (2053, 0.375), (2054, 0.375), (2055, 0.375), (2056, 0.375), (2057, 0.375), (2058, 0.375), (2059, 0.375), (2060, 0.375), (2061, 0.375), (2062, 0.375), (2063, 0.375), (2064, 0.375), (2065, 0.375), (2066, 0.375), (2067, 0.375), (2068, 0.375), (2069, 0.375), (2070, 0.375)

Units: Dimensionless

TxConsPop = GRAPH(TIME)

(2016, 169), (2017, 169), (2018, 169), (2019, 169), (2020, 169), (2021, 169), (2022, 169), (2023, 169), (2024, 169), (2025, 169), (2026, 169), (2027, 169), (2028, 169), (2029, 169), (2030, 169), (2031, 169), (2032, 169), (2033, 169), (2034, 169), (2035, 169), (2036, 169), (2037, 169), (2038, 169), (2039, 169), (2040, 169), (2041, 169), (2042, 169), (2043, 169), (2044, 169), (2045, 169), (2046, 169), (2047, 169), (2048, 169), (2049, 169), (2050, 169), (2051, 169), (2052, 169), (2053, 169), (2054, 169), (2055, 169), (2056, 169), (2057, 169), (2058, 169), (2059, 169), (2060, 169), (2061, 169), (2062, 169), (2063, 169), (2064, 169), (2065, 169), (2066, 169), (2067, 169), (2068, 169), (2069, 169), (2070, 169)

Units: m^3/years-habitantes

TxIncAnualPop = GRAPH(TIME)

(2016, 0.005), (2017, 0.005), (2018, 0.005), (2019, 0.005), (2020, 0.005), (2021, 0.005), (2022, 0.005), (2023, 0.005), (2024, 0.005), (2025, 0.005), (2026, 0.005), (2027, 0.005), (2028, 0.005), (2029, 0.005), (2030, 0.005), (2031, 0.005), (2032, 0.005), (2033, 0.005), (2034, 0.005), (2035, 0.005), (2036, 0.005), (2037, 0.005), (2038, 0.005), (2039, 0.005), (2040, 0.005), (2041, 0.005), (2042, 0.005), (2043, 0.005), (2044, 0.005), (2045, 0.005), (2046, 0.005), (2047, 0.005), (2048, 0.005), (2049, 0.005), (2050, 0.005), (2051, 0.005), (2052, 0.005), (2053, 0.005), (2054, 0.005), (2055, 0.005), (2056, 0.005), (2057, 0.005), (2058, 0.005), (2059, 0.005), (2060, 0.005), (2061, 0.005), (2062, 0.005), (2063, 0.005), (2064, 0.005), (2065, 0.005), (2066, 0.005), (2067, 0.005), (2068, 0.005), (2069, 0.005), (2070, 0.005)

Units: 1/year

TxMigraPopRur = GRAPH(TIME)

(2016, 0.0183), (2017, 0.0183), (2018, 0.0183), (2019, 0.0183), (2020, 0.0183), (2021, 0.0183), (2022, 0.0183), (2023, 0.0183), (2024, 0.0183), (2025, 0.0183), (2026, 0.0183), (2027, 0.0183), (2028, 0.0183), (2029, 0.0183), (2030, 0.0183), (2031, 0.0183), (2032, 0.0183), (2033, 0.0183), (2034, 0.0183), (2035, 0.0183), (2036, 0.0183), (2037, 0.0183), (2038, 0.0183), (2039, 0.0183), (2040, 0.0183), (2041, 0.0183), (2042, 0.0183), (2043, 0.0183), (2044, 0.0183), (2045, 0.0183), (2046, 0.0183), (2047, 0.0183), (2048, 0.0183), (2049, 0.0183), (2050, 0.0183), (2051, 0.0183), (2052, 0.0183), (2053, 0.0183), (2054, 0.0183), (2055, 0.0183), (2056, 0.0183), (2057, 0.0183), (2058, 0.0183), (2059, 0.0183), (2060, 0.0183), (2061, 0.0183), (2062, 0.0183), (2063, 0.0183), (2064, 0.0183), (2065, 0.0183), (2066, 0.0183), (2067, 0.0183), (2068, 0.0183), (2069, 0.0183), (2070, 0.0183)

Units: 1/year

Sector Demanda Industria

DIND(t) = DIND(t - dt) + (DemInd - exitInd) * dt

INIT DIND = DemInd

Units: m^3/years

INFLOWS:

DemInd = VARGInd+VNECInd

Units: m^3/years^2

OUTFLOWS:

exitInd = DIND

Units: m^3/years^2

QInd(t) = QInd(t - dt) + (IncConsInd) * dt

INIT QInd = 1.84

Units: m^3/years

INFLOWS:

IncConsInd = QInd*TxCrecInd

Units: m^3/years-yr

CfAprInd = 0.81

Units: Dimensionless

CfGARInd = 1-CfAprInd

Units: Dimensionless

CfGARQui = 1-CfAprQui

Units: Dimensionless

DBOInd = 500

Units: kg/m^3

EquivPop_Ind = LoadInd/EquiPop

Units: habitantes

LoadInd = DBOInd*VARGIndustria

Units: kg/year

R$ingXInd =

(LoadInd*R$Contamina)+(R$cons*VConsumidoInd)+(VNECInd*R$Capta)

Units: BrazilianReal/years

VARGInd = VARGIndustria

Units: m^3/years

VARGIndustria = VConsInd*CfGARInd

Units: m^3/years

VARGQui = VConsQui*CfGARQui

Units: m^3/years

VConsInd = QInd*(86400*365)

Units: m^3/years

VConsQui = QQui*(86400*365)

Units: m^3/years

VConsumidoInd = VConsInd

Units: m^3/years

VNECInd = VNECIndustria

Units: m^3/years

VNECIndustria = CfAprInd*VConsInd

Units: m^3/years

VNECQui = CfAprQui*VConsQui

Units: m^3/years

TxCrecInd = GRAPH(TIME)

(2016, 0.03), (2017, 0.03), (2018, 0.03), (2019, 0.03), (2020, 0.03), (2021, 0.03), (2022, 0.03), (2023, 0.03), (2024, 0.03), (2025, 0.03), (2026, 0.03), (2027, 0.03), (2028, 0.03), (2029, 0.03), (2030, 0.03), (2031, 0.03), (2032, 0.03), (2033, 0.03), (2034, 0.03), (2035, 0.03), (2036, 0.03), (2037, 0.03), (2038, 0.03), (2039, 0.03), (2040, 0.03), (2041, 0.03), (2042, 0.03), (2043, 0.03), (2044, 0.03), (2045, 0.03), (2046, 0.03), (2047, 0.03), (2048, 0.03), (2049, 0.03), (2050, 0.03), (2051, 0.03), (2052, 0.03), (2053, 0.03), (2054, 0.03), (2055, 0.03), (2056, 0.03), (2057, 0.03), (2058, 0.03), (2059, 0.03), (2060, 0.03), (2061, 0.03), (2062, 0.03), (2063, 0.03), (2064, 0.03), (2065, 0.03), (2066, 0.03), (2067, 0.03), (2068, 0.03), (2069, 0.03), (2070, 0.03)

TxCrecQui = GRAPH(TIME)

(2004, 0.02), (2006, 0.02), (2007, 0.02), (2009, 0.02), (2011, 0.02), (2012, 0.02), (2014, 0.02), (2016, 0.015), (2017, 0.015), (2019, 0.015), (2021, 0.015), (2022, 0.015), (2024, 0.015), (2026, 0.015), (2027, 0.015), (2029, 0.015), (2031, 0.015), (2032, 0.015), (2034, 0.015), (2036, 0.015), (2037, 0.015), (2039, 0.015), (2041,

0.015), (2042, 0.015), (2044, 0.015), (2046, 0.015), (2047, 0.015), (2049, 0.015), (2051, 0.015), (2052, 0.015), (2054, 0.015)

Sector Demanda Pecuaria

DPEC(t) = DPEC(t - dt) + (DemPEC - exitPEC) * dt

INIT DPEC = DemPEC

Units: m^3/years

INFLOWS:

DemPEC = VARGpec+VNECpec

Units: m^3/years-yr

OUTFLOWS:

exitPEC = DPEC

Units: m^3/years-yr

PopHen(t) = PopHen(t - dt) + (IncPopHen) * dt

INIT PopHen = 2883420

Units: pollos

INFLOWS:

IncPopHen = PopHen*TxCrecHen

Units: pollos/yr

PopPec(t) = PopPec(t - dt) + (IncPopPec) * dt

INIT PopPec = 779966

Units: cabezas

INFLOWS:

IncPopPec = PopPec*TxCrecPec

Units: cabezas/yr

PopPig(t) = PopPig(t - dt) + (IncPopPig) * dt

INIT PopPig = 187101

Units: cerdos

INFLOWS:

IncPopPig = PopPig*TxCrecPig

Units: cerdos/yr

ConsHen = 0.00035*(365)

Units: m^3/years-pollos

ConsPec = 0.15*(365)

Units: m^3/years-cabezas

ConsPig = 0.2*(365)

Units: m^3/years-cabezas

DBOBovinos = 5000

Units: kg/year

DBOHen = 3500

Units: kg/year

DBOPig = 20000

Units: kg/year

EquiPop = 19.71

Units: kg/habitantes-year

EquivPop_Pec = LoadPec/EquiPop

Units: habitantes

LoadPec = ((DBOBovinos*365*VARGBovinos)+(DBOHen*365*VARGHen)+(DBOPig*365*VARGPig))/1000

Units: kg/year

R$cons = 0.02

Units: BrazilianReal/m^3

R$inXPEC = (LoadPec*R$Contamina)+(R$cons*VNECpec)+(VConsPec*R$Capta)

Units: BrazilianReal/years

VARGBovinos = VConsBovinos*CfGAR

Units: m^3/years

VARGHen = CfGAR*VConsHen

Units: m^3/years

VARGpec = VARGBovinos+VARGHen+VARGPig

Units: m^3/years

VARGPig = CfGAR*VConsPig

Units: m^3/years

VConsBovinos = (PopPec*ConsPec)

Units: m^3/years

VConsHen = PopHen*ConsHen

Units: m^3/years

VConsPec = VConsBovinos+VConsHen+VConsPig

Units: m^3/years

VConsPig = PopPig*ConsPig

Units: m^3/years

VNECpec = VConsPec

Units: m^3/years

TxCrecHen = GRAPH(TIME)

(2016, 0.04), (2017, 0.04), (2018, 0.04), (2019, 0.04), (2020, 0.04), (2021, 0.04), (2022, 0.04), (2023, 0.04), (2024, 0.04), (2025, 0.04), (2026, 0.04), (2027, 0.04), (2028, 0.04), (2029, 0.04), (2030, 0.04), (2031, 0.04), (2032, 0.04), (2033, 0.04), (2034, 0.04), (2035, 0.04), (2036, 0.04), (2037, 0.04), (2038, 0.04), (2039, 0.04), (2040, 0.04), (2041, 0.04), (2042, 0.04), (2043, 0.04), (2044, 0.04), (2045, 0.04), (2046, 0.04), (2047, 0.04), (2048, 0.04), (2049, 0.04), (2050, 0.04), (2051, 0.04), (2052, 0.04), (2053, 0.04), (2054, 0.04), (2055, 0.04), (2056, 0.04), (2057, 0.04), (2058, 0.04), (2059, 0.04), (2060, 0.04), (2061, 0.04), (2062, 0.04), (2063, 0.04), (2064, 0.04), (2065, 0.04), (2066, 0.04), (2067, 0.04), (2068, 0.04), (2069, 0.04), (2070, 0.04)

Units: 1/year

TxCrecPec = GRAPH(TIME)

(2016, 0.001), (2017, 0.001), (2018, 0.001), (2019, 0.001), (2020, 0.001), (2021, 0.001), (2022, 0.001), (2023, 0.001), (2024, 0.001), (2025, 0.001), (2026, 0.001), (2027, 0.001), (2028, 0.001), (2029, 0.001), (2030, 0.001), (2031, 0.001), (2032, 0.001), (2033, 0.001), (2034, 0.001), (2035, 0.001), (2036, 0.001), (2037, 0.001), (2038, 0.001), (2039, 0.001), (2040, 0.001), (2041, 0.001), (2042, 0.001), (2043, 0.001), (2044, 0.001), (2045, 0.001), (2046, 0.001), (2047, 0.001), (2048, 0.001), (2049, 0.001), (2050, 0.001), (2051, 0.001), (2052, 0.001), (2053, 0.001), (2054, 0.001), (2055, 0.001), (2056, 0.001), (2057, 0.001), (2058, 0.001), (2059, 0.001), (2060, 0.001), (2061, 0.001), (2062, 0.001), (2063, 0.001), (2064, 0.001), (2065, 0.001), (2066, 0.001), (2067, 0.001), (2068, 0.001), (2069, 0.001), (2070, 0.001)

Units: 1/year

TxCrecPig = GRAPH(TIME)

(2016, 0.06), (2017, 0.06), (2018, 0.06), (2019, 0.06), (2020, 0.06), (2021, 0.06), (2022, 0.06), (2023, 0.06), (2024, 0.06), (2025, 0.06), (2026, 0.06), (2027, 0.06), (2028, 0.06), (2029, 0.06), (2030, 0.06), (2031, 0.06), (2032, 0.06), (2033, 0.06), (2034, 0.06), (2035, 0.06), (2036, 0.06), (2037, 0.06), (2038, 0.06), (2039, 0.06), (2040, 0.06), (2041, 0.06), (2042, 0.06), (2043, 0.06), (2044, 0.06), (2045, 0.06),

(2046, 0.06), (2047, 0.06), (2048, 0.06), (2049, 0.06), (2050, 0.06), (2051, 0.06), (2052, 0.06), (2053, 0.06), (2054, 0.06), (2055, 0.06), (2056, 0.06), (2057, 0.06), (2058, 0.06), (2059, 0.06), (2060, 0.06), (2061, 0.06), (2062, 0.06), (2063, 0.06), (2064, 0.06), (2065, 0.06), (2066, 0.06), (2067, 0.06), (2068, 0.06), (2069, 0.06), (2070, 0.06)

VolARetorno = VARGag+VARGInd+VARGpec+VARGpop

Units: m^3/years

Sector Volumen Total Requerido BH ALPA

VolTotalReq_ALPA = VolTotReq

Units: m^3/years

VolTotReq = DAG+DAMB+DIND+DPOP+DPEC

Units: m^3/years

Sector Equivalente Populacional

EquivPop_ALPA = EquivPop_Ag+EquivPop_Ind+EquivPop_Pec

Units: habitantes