RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 17/02/2022.

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

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

BRUNA NOGUEIRA REZENDE

APLICAÇÃO DO MODELO WEAP EM CENÁRIOS DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA NA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS BAIXO PARDO/GRANDE

Botucatu

2021

BRUNA NOGUEIRA REZENDE

APLICAÇÃO DO MODELO WEAP EM CENÁRIOS DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA NA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS BAIXO PARDO/GRANDE

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador(a): Alexandre Barcellos Dalri

Coorientador(a): Edson de Oliveira Vieira

Botucatu

2021

R467a

Rezende, Bruna Nogueira

Aplicação de modelo WEAP em cenários de alocação de água na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Baixo Pardo/Grande / Bruna Nogueira Rezende. -- Botucatu, 2021

75 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Barcellos Dalri

Coorientador: Edson de Oliveira Vieira

1. Gestão de recursos hídricos. 2. Modelagem hidrológica. 3. WEAP. 4. Aumento de áreas irrigadas. 5. Cenário de gestão de água. 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 DISSERTAÇÃO: APLICAÇÃO DO MODELO WEAP EM CENÁRIOS DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA NA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS BAIXO PARDO/GRANDE

AUTORA: BRUNA NOGUEIRA REZENDE
ORIENTADOR: ALEXANDRE BARCELLOS DALRI
COORIENTADOR: EDSON DE OLIVEIRA VIEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI (Participaçao Virtual)
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal - UNESP

Prof. Dr. JOAO CARLOS CURY SAAD (Participaçao Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. DONIZETI APARECIDO PASTORI NICOLETE (Participaçao Virtual)
Engenharia Civil / Faculdades Integradas de Bauru

Botucatu, 17 de fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter permitido que mais um sonho se realizasse e por me sustentar todos os momentos dessa caminhada.

Aos meus pais Maria Nívia e José Cirilo, pelo incentivo, amor e por nunca medirem esforços para a realização dos meus sonhos.

A minha irmã Brenda, pela amizade, companheirismo e por todo apoio.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FCA), pela oportunidade de formação acadêmica.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida.

Ao professor Alexandre Barcellos Dalri pela orientação, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho.

Ao professor Edson de Oliveira Vieira pela coorientação, amizade, confiança, pelos conhecimentos proporcionados, por ter me incentivado a seguir na área acadêmica desde a graduação. Obrigada pelo exemplo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela dedicação e os ensinamentos proporcionados, e a Seção Técnica de Pós-Graduação por todo comprometimento profissional.

Ao professor João Carlos Cury Saad e ao Donizeti Nicoleti pela participação na banca examinadora, pela contribuição e conhecimentos proporcionados.

Aos meus amigos pela convivência, amizade e por todo incentivo.

A todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A água é o recurso primordial para toda a forma de vida, assim como é essencial para a agricultura em muitas regiões do mundo. Os desafios para uma gestão eficiente do uso sustentável da água diante do crescimento populacional estão sendo enfrentados gradualmente, no entanto os países em desenvolvimento encontram dificuldades para lidar com a falta de infraestrutura, aumento da demanda por água, solucionar os problemas de escassez e gerenciar os conflitos entre os usuários de água. A agricultura é o uso da terra dominante na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) Baixo Pardo/Grande, exibindo uma taxa de crescimento expressivo ao longo dos anos para a área cultivada de cana-de-açúcar, ocupando áreas antes utilizadas como pastagens e culturas tradicionais. Analisar a sustentabilidade dos recursos hídricos considerando os cenários futuros é essencial para o planejamento e gestão da água. Modelos hidrológicos como o WEAP (Water
Evaluation and Planning System), auxilia na análise de cenários futuros e permite analisar a disponibilidade de água atual e futura. Deste modo, o objetivo geral deste estudo foi utilizar o modelo WEAP para simular o comportamento hidrológico dos recursos hídricos e analisar a disponibilidade de água em um trecho da UGRHI Baixo Pardo/Grande, no estado de São Paulo, Brasil. Analisou-se as mudanças no uso e cobertura da terra para o período de 1988 a 2019. O modelo foi calibrado (1988-2015) e validado (2016-2019). Cenários futuros foram projetados para o período de 2020 a 2040 considerando o aumento das demandas de água e o aumento de áreas irrigadas. Índices de sustentabilidade foram gerados para cada cenário proposto. Os resultados indicaram que a calha principal do rio Pardo possui boa disponibilidade hídrica para atender as demandas dos setores usuários de água, com a capacidade de conceder novas outorgas.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos. Modelagem hidrológica. Aumento de áreas irrigadaa. WEAP.

ABSTRACT

Water is the primary resource for all forms of life, as well as essential for agriculture in many regions of the world. The challenges for an efficient management of the sustainable use of water in the face of population growth are gradually being faced, however developing countries find it difficult to deal with the lack of infrastructure, increased demand for water, solve scarcity problems and manage conflicts between water users. Agriculture is the dominant land use in the Baixo Pardo /Grande Water Resources Management Unit (UGRHI), showing a significant growth rate over the years for the sugarcane cultivated area, occupying areas previously used as pasture and traditional cultures. Analyzing the sustainability of water resources considering future scenarios is essential for water planning and management. Hydrological models such as WEAP (Water Evaluation and Planning System), assists in the analysis of future scenarios and allows to analyze the current and future water availability. Thus, the general objective of this study was to use the WEAP model to simulate the hydrological behavior of water resources and to analyze the availability of water in a stretch of the UGRHI Baixo Pardo / Grande, in the state of São Paulo, Brazil. Changes in land use and land cover for the period from 1988 to 2019 were analyzed. The model was calibrated (1988-2015) and validated (2016-2019). Future scenarios were projected for the period from 2020 to 2040 considering the increase in water demands and the increase in irrigated areas. Sustainability indexes were generated for each proposed scenario. The results indicated that the main gutter of the Pardo River has good water availability to meet the demands of the water user sectors, with the ability to grant new grants.

Keywords: Water resources management. Hydrological modeling. Increase in irrigated áreas. WEAP.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL 13

CAPÍTULO 1 - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA A UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS BAIXO PARDO/GRANDE 21

RESUMO 21
ABSTRACT 22
1.1 INTRODUÇÃO 23
1.2 MATERIAL E MÉTODOS 25
1.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 25
1.2.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO WEAP 26
1.2.2.1 RAINFALL RUNOFF (SOIL MOISTURE METHOD) 26
1.2.2.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO 28
1.2.2.3 DADOS DE ENTRADA DO MODELO WEAP 29
1.2.2.4 DADOS CLIMÁTICOS 31
1.2.2.5 DADOS FLUVIOMÉTRICOS 32
1.2.2.6 USO E COBERTURA DA TERRA 35
1.2.2.7 PARÂMETROS DO SOLO 35
1.2.2.8 PARÂMETROS DA COBERTURA VEGETAL 36
1.2.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO 37
1.2.4 DADOS DE DEMANDA PELO USO DA ÁGUA 38
1.2.5 ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO MODELO 43
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 44
1.3.1 USO E COBERTURA DA TERRA 44
1.3.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO WEAP 47
1.4. CONCLUSÃO 53

REFERÊNCIAS 54

CAPÍTULO 2 - APLICABILIDADE DO MODELO WEAP PARA A UGRHI BAIXO PARDO/GRANDE 57

RESUMO 58
ABSTRACT 59
2.1 INTRODUÇÃO 59
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 60
2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 60
2.2.2 WEAP 62
2.2.3 DEMANDA PELO USO DA ÁGUA 62
2.2.4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA 63
2.2.5 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS 63
2.2.6 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS 64
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 65
2.3.1 DEMANDA DE ÁGUA ATUAL 65

2.3.2 DISPONIBILIDADE HÍDRICA ATUAL 66
2.3.3 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE 68
2.3.4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA FUTURA 69
2.4 CONCLUSÃO 70
REFERÊNCIAS 70
CONSIDERAÇÕES FINAIS 72
REFERÊNCIAS 73

INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente uma das principais preocupações voltadas para a questão hídrica tem sido a disponibilidade, quantidade, qualidade, distribuição, alocação de recursos hídricos limitada e as mudanças climáticas. A água é o recurso primordial para toda a forma de vida, assim como é essencial para a agricultura em muitas regiões do mundo. Os desafios para uma gestão eficiente do uso sustentável da água diante do crescimento populacional estão sendo enfrentados gradualmente, no entanto os países em desenvolvimento encontram dificuldades para lidar com a falta de infraestrutura, aumento da demanda por água, solucionar os problemas de escassez e gerenciar os conflitos entre os usuários de água.

O aumento da concentração populacional nos centros urbanos atrelado ao crescimento de atividades que demandam um grande volume de água, desencadeia uma pressão gradativa nos recursos hídricos. O histórico da evolução do uso da água está associado ao processo de urbanização e desenvolvimento econômico do país. A demanda hídrica no Brasil é crescente, visto que nos últimos vinte anos houve o aumento expressivo de aproximadamente 80% no total retirado de água. Até 2030 é previsto que a retirada aumente 26% (ANA, 2019).

Dentre os setores usuários da água no Brasil, a agricultura irrigada é o principal em relação às vazões de retiradas, correspondendo a 49,8%, seguida do abastecimento humano urbano, industrial, uso animal, termelétricas, abastecimento rural e mineração, com 24,4%, 9,6%, 8,3%, 4,5%,1,7% e 1,7%, respectivamente. Em relação à vazão consumida, a irrigação representa 66,1%, seguida do abastecimento animal, indústria, abastecimento urbano, abastecimento rural, mineração e termelétricas com 11,6%, 9,5%, 9,1%, 2,5%, 0,9% e 0,3%, respectivamente (ANA, 2019).

Embora o país disponha de um potencial hídrico expressivo, inúmeras regiões enfrentam problemas relacionados a variabilidade temporal e espacial das águas, associados à variação pluviométrica e sua sazonalidade. Contudo, as bacias hidrográficas localizadas em áreas com baixa disponibilidade e grande demanda hídrica passam por situações de estresse e escassez de água. Um fator agravante tem sido as mudanças climáticas, que promovem a frequência dos eventos extremos, especialmente secas e inundações, afetando fortemente a economia

brasileira (Brasil, 2006; VIEIRA et. al., 2020). Como exemplo, no ano de 2018 a região hidrográfica do Paraná exibiu comportamentos distintos ao longo do seu território. Na porção inserida no estado de São Paulo, nas bacias dos rios Tietê e Grande, observou-se uma variação de seco a extremamente seco no comportamento climático, registrando as maiores secas na história (ANA, 2019).

Compreender as alterações climáticas associadas aos efeitos das mudanças do uso da terra é primordial para o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Ações que alteram a cobertura do solo sem o devido planejamento, como a substituição de florestas nativas por pastagem, aumento da área plantada, expansão da agricultura irrigada, resultam em alterações dos sistemas naturais e consequentemente no ciclo hidrológico, afetando diretamente a qualidade e quantidade de água disponível em uma bacia (VIEIRA et. al., 2020).

A agricultura é o uso da terra dominante na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) Baixo Pardo/Grande, exibindo uma taxa de crescimento expressivo ao longo dos anos para a área cultivada de cana-de-açúcar, ocupando áreas antes utilizadas como pastagens e culturas tradicionais. A vegetação natural da bacia foi significativamente alterada por atividades antrópicas, acarretando mudanças consideráveis nas condições das águas superficiais da UGRHI, seja pelo balanço hídrico, seja pela qualidade das águas nas áreas urbanas e a jusante delas. (CBH-BPG, 2008).

Uma vez que as demandas para o uso de água doce continuam a aumentar, faz-se necessário garantir a sustentabilidade desses recursos. Isso é realizado através de estratégias de gestão que utilizam o monitoramento e o uso de modelos hidrológicos. Entretanto, o monitoramento em grandes escalas não é viável e, deste modo, as aplicações dos modelos estão se tornando desafiadoras, em virtude das limitações referentes aos dados disponíveis para o desempenho dos modelos (HERMAN et al., 2018).

Em diversas regiões no Brasil, a disponibilidade de dados hidrometeorológicos com séries temporais longas e confiáveis é escassa, apresentando dados de estações convencionais e automáticas com falhas, seja por falta de medição ou por falha nos equipamentos. A extensão territorial e a dificuldade de acesso às estações de algumas regiões são os principais fatores que configuram

a defasagem nos dados climatológicos e hidrológicos (BIER et al., 2017; MELLO; KHOLS; OLIVEIRA, 2017).

Os impactos

A decadência na infraestrutura de monitoramento tem impactos mais amplos além da perda de medições de vazão: os medidores fomentam os estudos com modelagem hidrológica em que os dados obtidos são utilizados para calibração e ajuste, a fim de garantir que os modelos representem as bacias hidrográficas com a maior precisão possível. A falta de dados significa que as avaliações futuras dos recursos hídricos, crucialmente necessárias, que resultam de modelos bem calibrados e validados em conjunto com os cenários climáticos futuros, terão maior chance de incerteza (GLEASON; WADA; WANG, 2018).

As mudanças na cobertura e uso do solo influenciam as características de escoamento de uma bacia hidrográfica, que por sua vez, afetam a disponibilidade de água superficial e subterrânea da área e, portanto, levam a mudanças adicionais no uso e ocupação do solo. Tal análise pode ser feita com eficácia utilizando modelos de simulação de bacias hidrográficas integrados com o Sistema de Informação Geográfica - SIG (PARR; WANG; BJERKLIE, 2015).

O sensoriamento remoto por satélite pode fornecer uma contribuição valiosa para as previsões hidrológicas devido à sua ampla cobertura e aumento das resoluções espaço-temporais (JIANG; WANG, 2019). No entanto, a precisão das variáveis hidrológicas estimadas pode variar, dependendo do sensor, região, condições atmosféricas e condições locais da superfície (HARTANTO et al., 2017).

As informações de uso e cobertura da terra podem ser interpretadas usando dados de sensoriamento remoto de alta resolução espacial, como imagens Landsat (30 metros), Sentinel 2 (10 metros) e GaoFen-2 (1 metro, 4 metros). Como uma das entradas mais importantes em modelos hidrológicos, os dados de uso e ocupação da terra de alta precisão podem melhorar a simulação do impacto da atividade humana nos ciclos hidrológicos. A evapotranspiração real e a umidade do solo por sensoriamento remoto podem ser utilizadas em conjunto com os modelos hidrológicos (JIANG; WANG, 2019).

Melhores predições hidrológicas podem ser alcançadas utilizando diferentes resultados de simulação do uso de umidade do solo por sensoriamento remoto, evapotranspiração real ou observações de fluxo de água, bem como suas respectivas combinações. As contribuições para as estimativas hidrológicas podem

ser avaliadas e comparadas para buscar um melhor desempenho do modelo (JIANG; WANG, 2019).

Para grandes bacias hidrográficas em estudo no mundo, órgãos de fomento têm apoiado a modelagem hidrológica para gestão e planejamento de recursos hídricos, a partir de duas perspectivas: para informar as decisões relacionadas ao desenvolvimento nacional e redução da pobreza; e para evitar conflitos transfronteiriços, promovendo alocação e acesso equitativos dos recursos hídricos (JOHNSTON; SMAKHTIN, 2014).

Os modelos hidrológicos são representações matemáticas imperfeitas e simplificadas dos processos complexos, dinâmicos e não lineares da transformação chuva-vazão. São ferramentas essenciais para compreender as variáveis hidrológicas passadas e quantificar as mudanças hidrológicas futuras. Eles variam do conceitual ao físico e do agrupado ao distribuído, representando vários níveis de complexidade (PARR; WANG; BJERKLIE, 2015).

Os modelos hidrológicos distribuídos exigem grandes quantidades de dados, informações e parâmetros para representar com precisão a variabilidade espacial dos principais processos hidrológicos. A estimativa de parâmetros é sempre uma tarefa complexa e onerosa, muitas vezes inacessível e, desta forma, os modelos distribuídos têm sido desconsiderados em favor dos modelos concentrados ou semi-distribuídos (FRANCÉS; VÉLEZ; VÉLEZ, 2007). Nesse sentido, o (Water Evaluation and Planning System – WEAP) é um modelo concentrado, que possui uma segmentação espacial realizada com base em sub-bacias, bandas de elevação, Unidades de Resposta Hidrológica (URH) ou Elementos Hidrológicos Urbano (EHU) (SANZANA, et al., 2018).

A gestão integrada dos recursos hídricos (Integrated Water Resouces Management – IWRM) é uma abordagem holística para enfocar os fatores ambientais e socioeconômicos que influenciam a disponibilidade e o abastecimento de água. Em locais onde os recursos hídricos são limitados faz-se indispensável a sua aplicação (FRIESEN et al., 2017). A modelagem dos recursos hídricos contribui na aplicação do IWRM em bacias hidrográficas, e deste modo o WEAP é um modelo de IWRM que integra perfeitamente a hidrologia da bacia, demandas e abastecimento de água (YATES et al., 2005).

O WEAP foi desenvolvido em 1988 pelo *Stockholm Environment Institute* - SEI, na Suécia e se distingue dos demais modelos por ter sua abordagem integrada

para simular sistemas de água e por sua orientação política. Como uma ferramenta de análise de políticas, o modelo avalia uma gama completa de opções de desenvolvimento e gerenciamento de água, e leva em consideração vários usos concorrentes dos sistemas. Tem o propósito de ser uma ferramenta flexível e transparente para o planejamento, que avalia a sustentabilidade com relação à oferta e demanda hídrica, tal como proporciona o estudo de cenários futuros (YATES *et al*., 2005; SHUMET; MENGISTU, 2016).

O algoritmo principal do WEAP é o balanço hídrico, usado para definir a escala evaporativa da bacia hidrográfica, demandas, processos pluviométricos e recarga de água subterrânea. O cálculo é feito em uma base mensal equilibrando o abastecimento e a demanda de água em cada nó e link no sistema. Os nós representam pontos de demanda, enquanto os links os conectam. A estrutura do nó e do link permite agregar e desagregar os componentes do balanço hídrico, dependendo da entrada disponível de dados (HÖLLERMANN; GIERTZ; DIEKKRÜGER, 2010).

Uma das principais características do modelo é o fato de que ele considera as prioridades de demanda dos diversos setores usuários de água na bacia. O WEAP coloca a demanda do lado da equação - padrões de uso de água, eficiência de equipamentos, reutilização, preços e alocação - em igualdade com a oferta, águas subterrâneas, reservatórios e transferências de água (SIEBER; PURKEY, 2007). A análise é baseada em um algoritmo de programação linear para resolver o problema de alocação de água utilizando uma abordagem interativa, buscando maximizar a satisfação da demanda a partir das prioridades de oferta e demanda. O balanço de massa é realizado a cada intervalo de tempo, contabilizando a água disponível e a demanda por água pelos múltiplos usuários (ASSAF et al., 2008).

O WEAP pode ser aplicado para o planejamento a nível de bacia hidrográfica, sistemas municipais e agrícolas, possibilitando a avaliação do efeito das políticas de alocação de água atuais e futuras, o efeito das captações em reservatórios e a fio d'água, a análise das demandas de água pelos setores usuários, a modelagem chuva-vazão, o balanço hídrico, a modelagem da qualidade da água, o transporte de sedimentos, geração de poluição, tratamento, descarga e a administração dos recursos hídricos (YATES et al., 2005).

O WEAP tem sido amplamente utilizado para estudar diferentes questões de planejamento integrado de recursos hídricos abordando as dimensões das

mudanças climáticas, água e agricultura. Esteve et al. (2015), por exemplo, utilizaram o modelo para avaliar os impactos das alterações climáticas no sistema de água e nas lavouras da Bacia do Médio Guadiana, Espanha. Vieira e Sandoval-Solis (2018), calcularam os índices de sustentabilidade dos recursos hídricos da Bacia do Rio Verde Grande, Brasil, avaliando e comparando a demanda e a água disponível para as atividades previstas no plano de recursos hídricos para três cenários futuros de disponibilidade hídrica. Silva et al. (2020), analisaram as tendências nos dados de vazão e precipitação para a bacia do rio Paracatu-MG, Brasil, com simulações de cenários futuros com base nas mudanças climáticas e no aumento da área irrigada. Ougougdal et al. (2020), avaliaram o impacto das mudanças climáticas e das atividades socioeconômicas sobre o abastecimento e a demanda de água na bacia hidrográfica de Ourika, Alto Atlas do Marrocos.

Para utilizar o modelo são necessários diversos dados de entrada, desde parâmetros do solo até dados hidrometeorológicos da área de estudo, que podem ser levantados em campo ou obtidos através de técnicas de geoprocessamento. Para tanto, são imprescindíveis as informações sobre as demandas dos setores usuários, fontes de abastecimento, dados econômicos, séries históricas com dados pluviométricos e de vazão, parâmetros do solo associado as culturas, dados históricos sobre a evolução do uso e ocupação da terra (ASSAF et al.,2008).

Os modelos hidrológicos devem ser calibrados para serem úteis para a solução de problemas práticos. Os valores devem ser estimados para que o modelo corresponda intimamente ao comportamento real que representa o sistema. Em alguns casos, os valores apropriados para um parâmetro do modelo podem ser determinados por meio de medições realizadas no sistema real. No entanto, em muitas situações, os parâmetros do modelo são representações conceituais das características abstratas das bacias hidrográficas e devem ser determinados através de um processo de tentativa e erro que ajusta os valores de parâmetro para corresponder à resposta do modelo aos dados históricos de entrada-saída. Os procedimentos usuais na calibração do modelo hidrológico vão desde a abordagem clássica de tentativa e erro até algoritmos de aprendizagem automatizados para ajustar uma variável de saída modelada (BOYLE; GUPTA; SOROOSHIAN, 1998).

O modelo pode ser calibrado manualmente pelo usuário permitindo-o calibrar os parâmetros como melhor convir. A utilização da calibração manual exige do usuário uma maior compreensão do comportamento do modelo, os processos que

decorrem na bacia e a sensibilidade dos parâmetros (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

Conforme descrito, o objetivo da calibração é ajustar os parâmetros de modo que as soluções do modelo se ajustem às observações em uma forma ideal. As duas abordagens gerais para avaliar a qualidade da calibração são a subjetiva e a objetiva. A avaliação subjetiva é baseada numa comparação visual dos resultados da simulação com os dados observados. Em contraste, a objetiva baseia-se no desenvolvimento de algumas medidas quantitativas da qualidade de ajuste (ABRISHAMCHI et al., 2007).

A validação do modelo está baseada na utilização dos parâmetros pré-calibrados, na qual são aplicados em períodos distintos dos anos utilizados na calibração. A qualidade dos resultados do modelo pode ser avaliada por meio de métodos estatísticos, como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) (NASH; SUTTCLIFE, 1970), índice de concordância de Willmott (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação, entre outros. Após a validação e aplicação dos coeficientes estatísticos, se o modelo alcançar uma performance satisfatória, torna-se exequível as simulações do processo modelado conforme os cenários propostos.

Os cenários fornecem um ponto de partida para o diálogo com as partes interessadas sobre as várias opções de alocação de recursos hídricos. São baseados em suposições sobre as variabilidades e mudanças climáticas, demografia, políticas de desenvolvimento, fatores que afetam a demanda, aumento da eficiência da irrigação, incremento de áreas irrigadas, modificações no uso e ocupação da terra, metas de reduções nos padrões de consumo de água pelos usuários, projeções de abastecimento de água (YATES et al., 2005).

Para avaliar e comparar as projeções futuras sobre a disponibilidade e abastecimento de água, índices de desempenho são utilizados tanto para reduzir impactos negativos de eventos reais e esperados, quanto para atender às necessidades de água para as diversas atividades humanas e ao meio ambiente. Para atingir essa meta, o índice de sustentabilidade identifica políticas que preservam ou melhoram as características desejadas de gestão da água da bacia no futuro, considerando medidas de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Se a política proposta ou ação do plano de gestão dos recursos hídricos da bacia tornar o sistema mais sustentável, o índice de sustentabilidade apontará que o sistema terá

uma capacidade adaptativa maior. Dessa maneira, em situações de conflito entre os usuários de água na bacia, o índice de sustentabilidade pode ser aplicado para avaliar as várias ações propostas no plano de recursos hídricos no que diz respeito às várias demandas setoriais e cenários futuros (VIEIRA; SANDOVAL-SOLIS, 2018).

Desta forma, o objetivo geral do trabalho foi utilizar o modelo WEAP para simular o comportamento hidrológico dos recursos hídricos e analisar a disponibilidade de água em um trecho da UGRHI Baixo Pardo/Grande, no estado de São Paulo, Brasil. Por conseguinte, os objetivos específicos foram:

- Calibrar e validar o modelo WEAP para um trecho da UGRHI Baixo Pardo/Grande;
- Gerar e analisar cenários futuros que envolvam o aumento da área irrigada;
- Gerar índices de Confiabilidade/Segurança, Vulnerabilidade, Resiliência, Sustentabilidade para a área de estudo conforme os cenários futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados neste estudo mostram que é possível realizar a gestão de recursos hídricos utilizando modelos hidrológicos. É extremamente importante diagnosticar as condições atuais e futuras das bacias hidrográficas, abordando os efeitos das políticas de alocação de água e as medidas adotadas pelos órgãos gestores.

Os cenários utilizados foram definidos com base no setor que mais demanda água: irrigação. Para que as projeções gerem resultados mais próximos da realidade da área de estudo seria fundamental uma comunicação entre os setores público e privado, para que os interesses de ambos sejam incluídos nas análises futuras.

Este estudo portou limitações significativas em virtude da falta de estações fluviométricas com dados consistentes distribuídas dentro do trecho estudado da UGRHI 12.

REFERÊNCIAS

ABRISHAMCHI, A. *et al*. Water resources management scenario analysis in Karkheh River Basin, Iran, using WEAP model. **Hydrological science and technology**, v. 23, n. 1, p. 1–12, 2007.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2019**.

ASSAF, H. *et al*. Chapter Thirteen Generic Simulation Models for Facilitating Stakeholder Involvement in Water Resources Planning and Management: A Comparison, Evaluation, and Identification of Future Needs. **Developments in Integrated Environmental Assessment**, v. 3, p. 229–246, 2008.

BIER, A. A. *et al*. Comparação de Metodologias de Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215–226, 2017.

BOYLE, D. P.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. **Water Resources Research**, v. 34, n. 4, p. 751–763, 1998.

BRASIL. **Plano Nacional de Recursos Hídricos. Síntese Executiva**, 2006. (Nota técnica).

CBH-BPG. **Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Baixo Pardo/Grande - UGRHI 12**: Relatório Técnico CPTI n. 396/08. São Paulo, 2008.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, E. C. M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.

ESTEVE, P. *et al*. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. **Ecological Economics**, v. 120, p. 49–58, 2015.

FRANCÉS, F.; VÉLEZ, J. I.; VÉLEZ, J. J. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 1–2, p. 226–240, 2007.

FRIESEN, J. *et al*. Environmental and socio-economic methodologies and solutions towards integrated water resources management. **Science of the Total Environment**, v. 581–582, p. 906–908, 2017.

GLEASON, C. J.; WADA, Y.; WANG, J. A Hybrid of Optical Remote Sensing and Hydrological Modeling Improves Water Balance Estimation. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, n. 1, p. 2–17, 2018.

HARTANTO, I. M. *et al*. Data assimilation of satellite-based actual evapotranspiration in a distributed hydrological model of a controlled water system**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 57, p. 123–135, 2017.

HERMAN, M. R. *et al*. Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 39–49, 2018.

HÖLLERMANN, B.; GIERTZ, S.; DIEKKRÜGER, B. Benin 2025-Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP “Water Evaluation and Planning” System. **Water Resources Management**, v. 24, n. 13, p. 3591–3613, 2010.

JIANG, D.; WANG, K. The role of satellite-based remote sensing in improving simulated streamflow: A review. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 8, p. 10–14, 2019.

JOHNSTON, R.; SMAKHTIN, V. Hydrological Modeling of Large river Basins: How Much is Enough? **Water Resources Management**, v. 28, n. 10, p. 2695–2730, 2014.

MELLO, R. Y.; KOHLS, W.; OLIVEIRA, T. M. N. Uso de diferentes métodos para o preenchimento de falhas em estações pluviométricas. **Boletim de Geografia**, v. 35, n. 1, 2017.

NASH, J. E.; SUTTCLIFE, J. E. River flow forecasting through conceptual model: Part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. V. 10, n. 3, pp. 282-290. 1970.

OUGOUGDAL, H. A. *et al*. Assessment of futurewater demand and supply under IPCC climate change and socio-economic scenarios, using a combination of models in Ourika watershed, High Atlas, Morocco. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 6, 2020.

PARR, D.; WANG, G.; BJERKLIE, D. Integrating remote sensing data on evapotranspiration and leaf area index with hydrological modeling: Impacts on model performance and future predictions. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 5, p. 2086–2100, 2015.

SANZANA, P. *et al*. Herramientas hydroinformaticas y consideraciones para modelar procesos superficiales y subterráneos acoplados mediante WEAPMODFLOW. In: XXVIII Congreso LatinoAmericano de Hydráulica, 2018, Buenos Aires. **Anais** [...]. Buenos Aires: 2019. p. 1221-1236.

SHUMET, A. G.; MENGISTU, K. T. Assessing the Impact of Existing and Future Water Demand on Economic and Environmental Aspects (Case Study from Rift Valley Lake Basin: Meki-Ziway Sub Basin), Ethiopia. **International Journal of Waste Resources**, v. 6, n. 2, 2016.

SIEBER J., PURKEY D. User Guide for WEAP21 (Water Evaluation and Planning System). Stockholm Environment Institute, US Center, p. 219, 2007.

SILVA, F. B. *et al*. Pluviometric and fluviometric trends in association with future projections in areas of conflict for water use. **Journal of Environmental Management**, v. 271, n. April, p. 110991, 2020.

VIEIRA, E. O. *et al*. **Integrated Water Resource Management: Cases from Africa, Asia, Australia, Latin America and USA**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020.

VIEIRA, E. O.; SANDOVAL-SOLIS, S. Water resources sustainability index for a water-stressed basin in Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 19, n. January, p. 97–109, 2018.

WILLMOTT, C. J. On the Validation of Models. **Physical Geography**, v. 2, p.184-194, 1981.

YATES, D. *et al*. WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation. **Water International**, v. 30, n. 4, p. 501–512, 2005.