



**CAMILA LÚCIA CARDOSO RIBEIRO**

**SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS E SEU EFEITO SOBRE OS RECURSOS  
HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMA  
(TO)**

**LAVRAS-MG  
2021**

**CAMILA LÚCIA CARDOSO RIBEIRO**

**SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEU EFEITO  
SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMA  
(TO)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ribeiro, Camila Lúcia Cardoso.

Simulações para a análise de mudanças climáticas e seu efeito  
sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Palma (TO) /  
Camila Lúcia Cardoso Ribeiro. - 2021.

80 p.

Orientador(a): Adriano Valentim Diotto.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Gestão de recursos hídricos. 2. Modelagem hidrológica. 3.  
Mudanças climáticas. I. Diotto, Adriano Valentim. II. Título.

**CAMILA LÚCIA CARDOSO RIBEIRO**

**SIMULAÇÕES PARA A ANÁLISE DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEU EFEITO  
SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMA  
(TO)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de julho de 2021.

Dr. Michael Silveira Thebaldi

UFLA

Dr. Felipe Schwerz

UFLA

Dra. Rosângela Francisca de Paula Vitor Marques UNINCOR

  
Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto  
Orientador

**LAVRAS-MG  
2021**

## **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

## Resumo geral

Em um cenário de aumento na demanda por água na agricultura, na indústria e para a geração de energia elétrica, influenciado por mudanças climáticas, torna-se importante o uso de ferramentas para auxiliar a gestão de recursos hídricos. Modelos hidrológicos e climáticos, assim como a metodologia de dinâmica de sistemas, podem simular situações reais, como os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. O objetivo deste trabalho foi avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia do rio Palma, e simular os impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação das principais culturas agrícolas da bacia. Para isso, foi criado um modelo de dinâmica de sistemas no software STELLA, representando a oferta e a demanda de água, assim como os principais componentes e relações entre estes, que influenciam no estoque de água na bacia. Para a oferta de água, foram utilizados dados futuros de escoamento gerados no modelo SWAT, considerando as projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES, e os cenários de emissão RCPs 4.5 e 8.5. No que diz respeito às demandas de água, foram utilizados dados dos censos e projeções do IBGE para as taxas de crescimento da população e pecuária, e dados da ABIMAQ para a agricultura irrigada. A demanda de irrigação foi simulada no AquaCrop, utilizando-se os dados de evapotranspiração potencial também gerados no SWAT. O horizonte de planejamento das simulações no STELLA foi de 2007 a 2099, sendo a unidade de tempo mensal. Os cenários avaliados foram de mudanças climáticas e de crescimento na área irrigada. Para avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia foi utilizado o Índice de Sustentabilidade (IS). Quanto aos resultados, no AquaCrop, os cenários que consideraram as projeções climáticas do modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, foram os que apresentaram maiores valores médios de demanda de irrigação. Todos os cenários avaliados apresentaram uma tendência de crescimento na demanda de irrigação anual. No STELLA, ao considerar o modelo Eta/HadGEM2-ES para o cenário de emissão 8.5, houve maior número de meses insustentáveis, o que demonstra que este modelo pode prever impactos hidrológicos maiores. Foi observada tendência de redução do IS e aumento de meses insustentáveis na maioria dos cenários. Assim, as mudanças climáticas e o consequente aumento na demanda de água para a irrigação das culturas, podem contribuir para problemas futuros na disponibilidade de água. Estes resultados poderão auxiliar na gestão dos recursos hídricos, de forma a impedir que a situação na bacia se torne insustentável e o uso de seus recursos possa continuar sem que isso afete seu ecossistema.

**Palavras-chave:** Dinâmica de sistemas. Modelagem hidrológica. Modelos de cultura.

## **Abstract**

In a scenario of increasing demand for water in agriculture, industry and for energy generation, influenced by climate change, it is important to use tools to assist in the management of water resources. Hydrological and climatic models, as well as the system dynamics methodology, can simulate real situations, such as the processes that occur in a water basin. The objective of this study was to evaluate the water resources sustainability in the Palma River basin, and to simulate the impacts of climate change on the irrigation demand of the main agricultural crops in the basin. For this, a system dynamics model was created in the STELLA software, representing water supply and demand, as well as the main components and relationships among them that influence the water stock in the basin. For water supply, future runoff data generated in the SWAT model were used, considering climate projections from the Eta-CPTEC/MIROC5 and Eta-CPTEC/HadGEM2-ES models, and the RCPs 4.5 and 8.5 emission scenarios. With regard to water demands, data from IBGE censuses and projections were used for population and livestock growth rates, and data from ABIMAQ for irrigated agriculture. Irrigation demand was simulated in AquaCrop, using potential evapotranspiration data also generated in SWAT. The planning horizon for the STELLA simulations was from 2007 to 2099, with a monthly time unit. The scenarios evaluated were climate change and growth in irrigated area. To evaluate the sustainability of water resources in the basin the Sustainability Index (SI) was used. As for the results, in AquaCrop, the scenarios that considered the climate projections of the Eta/HadGEM2-ES model for RCP 8.5, were the ones that presented the highest average irrigation demand values. All the scenarios evaluated showed an upward trend in annual irrigation demand. In STELLA, when considering the Eta/HadGEM2-ES model for the 8.5 emission scenario, there was a higher number of unsustainable months, which shows that this model can predict larger hydrological impacts. A trend of decreasing SI and increasing unsustainable months was observed for most scenarios. Thus, climate change and the consequent increase in water demand for crop irrigation, may contribute to future problems in water availability. These results can assist in the management of water resources, in order to prevent the situation in the basin from becoming unsustainable and the use of its resources can continue without affecting its ecosystem.

**Keywords:** System dynamics. Hydrological modeling. Crop models.

## SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
|       | PRIMEIRA PARTE.....   | 7  |
| 1     | INTRODUÇÃO.....   | 7  |
| 2     | REFERENCIAL TEÓRICO.....  | 9  |
| 2.1   | Processos hidrológicos.....   | 9  |
| 2.2   | Gestão de recursos hídricos.....  | 10 |
| 2.3   | Dinâmica de sistemas.....   | 11 |
| 2.3.1 | Software STELLA.....  | 12 |
| 2.3.2 | Calibração e validação.....   | 14 |
| 2.4   | Modelagem hidrológica.....  | 14 |
| 2.4.1 | Modelo hidrológico SWAT.....  | 15 |
| 2.5   | Modelagem e mudanças climáticas.....  | 16 |
| 2.6   | Agricultura e mudanças climáticas.....  | 18 |
| 2.6.1 | Modelo AquaCrop.....  | 19 |
| 2.6.2 | Calibração e validação.....   | 20 |
| 2.7   | A bacia do rio Palma.....   | 20 |
| 3     | CONSIDERAÇÕES GERAIS.....   | 23 |
|       | REFERÊNCIAS.....  | 24 |
|       | SEGUNDA PARTE - ARTIGOS.....  | 30 |
|       | ARTIGO 1 - MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A SUSTENTABILIDADE DOS<br>RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMA (TO) ...                          | 30 |
|       | ARTIGO 2 - IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A DEMANDA<br>POR ÁGUA PARA A IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS NA BACIA DO<br>RIO PALMA (TO) ..... | 59 |

## 1 INTRODUÇÃO

As demandas de água crescentes na agricultura, indústria e geração de energia elétrica, associadas a alterações na oferta de água, ocasionadas principalmente por fatores antrópicos, podem afetar a disponibilidade de água em uma bacia hidrográfica.

Fatores climáticos e geográficos também influenciam na disponibilidade de água, porém um fator agravante é o uso irracional dos recursos hídricos, que pode ocorrer devido à falta de estratégias para manter a qualidade e quantidade do recurso, à pouca integração entre a Política Nacional de Recursos Hídricos e as demais políticas públicas, e também devido aos problemas na área de saneamento básico e na distribuição da água doce (SILVA, 2009).

Os mecanismos de alocação de água são ferramentas de gestão dos recursos hídricos, que objetivam fornecer água aos atuais e futuros usuários, além de atender às demandas ambientais (LOPES; FREITAS, 2007). Para uma aplicação eficaz destes mecanismos, torna-se necessário o uso de ferramentas que representem os processos hidrológicos em uma bacia, e que possibilitem a simulação de cenários atuais e futuros.

Além disso, existem muitos problemas relacionados à gestão em bacias hidrográficas, como a escassez de monitoramento de vazão e limitações apresentadas pela técnica de regionalização de vazões, o que têm levado ao desenvolvimento de modelos hidrológicos para auxiliar a gestão de recursos hídricos (CALDEIRA et al., 2018).

Por meio da metodologia de dinâmica de sistemas é possível simular cenários a fim de detectar estes problemas, visto que esta metodologia permite estudar sistemas complexos considerando todos seus elementos constituintes simultaneamente (GALARZA et al., 2015). Modelos hidrológicos como o SWAT, também têm sido utilizados para auxiliar a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Esses modelos, associados a modelos climáticos, permitem, por exemplo, uma análise da influência de fatores climáticos no escoamento em uma bacia.

Se o padrão atual de emissão de gases de efeito estufa continuar, é provável que ocorram mudanças climáticas globais até o final do século, que podem levar a alterações como, aumento da temperatura e mudanças nos padrões de chuva. Essas alterações podem influenciar na disponibilidade de água, e além disso, afetar a produtividade agrícola, alterando a demanda de água na agricultura. Com o uso de modelos de cultura, como o AquaCrop, é possível prever as respostas das culturas agrícolas às variáveis ambientais, e assim simular alterações na necessidade hídrica das culturas sob condições de irrigação, em cenários de mudanças climáticas.

Neste contexto, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Palma (BHP), e simular os impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação das culturas agrícolas na bacia. Os objetivos específicos foram: simular a demanda por irrigação das principais culturas agrícolas cultivadas na bacia, utilizando dados futuros de evapotranspiração potencial em diferentes cenários climáticos; desenvolver e validar um modelo matemático, por meio da metodologia de dinâmica de sistemas, representando a oferta e a demanda de água na bacia; simular o comportamento do sistema hídrico na bacia, considerando diferentes cenários de mudanças climáticas e de crescimento na agricultura irrigada; calcular o Índice de Sustentabilidade, podendo-se assim analisar até quando a condição dos recursos hídricos na bacia será sustentável.

Esta dissertação é dividida em duas partes: a primeira compreende a introdução, o referencial teórico e as considerações gerais; a segunda parte é composta por dois artigos, sendo o primeiro a respeito da sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia do rio Palma, tendo em vista diferentes cenários de mudanças climáticas e crescimento da área irrigada, e o segundo abordando os impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação das principais culturas na bacia do rio Palma.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Processos hidrológicos

O ciclo hidrológico está relacionado à movimentação da água entre a atmosfera, oceanos e corpos d'água e suas interações com o continente, e é responsável pela renovação da água no planeta, sendo que sua manutenção se dá pela energia solar (ORELLANA GONZÁLEZ, 2010).

Segundo Kobiyama et al. (2011), os principais processos hidrológicos que fazem parte do ciclo hidrológico são a precipitação, a interceptação, a infiltração, a percolação no solo, os diversos tipos de escoamento e a evapotranspiração.

Após um evento de precipitação, uma parte do volume total precipitado é interceptada pela vegetação e o restante atinge a superfície do solo. Quando parte da água atravessa a superfície do solo, ocorre o processo de infiltração. No interior do solo, há o processo de percolação, onde a água apresenta movimento descendente, movida pela força da gravitacional e pelas características físicas do solo (HILLEL, 2004; LIBARDI, 2005). Quando a intensidade da precipitação é maior que a taxa de infiltração, a água começa a se acumular nas depressões que existem na superfície do solo, assim, quando a capacidade de retenção superficial se esgota, ocorre o escoamento superficial (PRUSKI, 2003).

A evapotranspiração é formada por dois processos: a evaporação, no qual a água líquida é convertida em vapor e removida da superfície, e a transpiração, onde ocorre a vaporização da água líquida presente nos tecidos das plantas e seu transporte à atmosfera (CARVALHO et al., 2012).

O ciclo hidrológico pode ser estudado tanto em uma escala global, quanto em uma escala menor, como uma bacia hidrográfica. O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica é o balanço entre entradas e saídas de água que por ela circula, sendo a precipitação a principal entrada, e a evapotranspiração e o escoamento, as saídas de água de uma bacia (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Modelos matemáticos podem representar os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas por meio de equações, o que permite uma melhor interpretação destes e contribui para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos (SANTOS et al., 2013).

## 2.2 Gestão de recursos hídricos

A importância da gestão de recursos hídricos começou a ser mais avaliada no meio técnico brasileiro com a promulgação da Lei Federal 9433/97 (BRASIL, 1997) e a criação da Agência Nacional de Águas (ANA). De acordo com a Lei 9433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para sua implantação, e devem ser utilizados os seguintes instrumentos: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos cursos d'água; a outorga de direito e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; a compensação aos municípios; e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (PORTO; PORTO, 2008).

Sánchez-Román et al. (2009) afirma que a gestão da água é uma importante função do desenvolvimento dos diversos componentes políticos, econômicos e sociais que atuam dentro da bacia hidrográfica. Ainda de acordo com Sánchez-Román et al. (2009), com o crescimento populacional haverá um aumento na demanda de água e de alimentos, podendo também haver um aumento na contaminação dos corpos de água. Surge assim o questionamento de até quando será possível satisfazer as demandas crescentes da população, mantendo o crescimento das atividades produtivas, sem prejudicar a sustentabilidade dos recursos hídricos (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009).

Dentre os principais problemas que podem contribuir para a escassez de água estão: a urbanização, que leva a um aumento na demanda por água; alterações na disponibilidade de água; infraestrutura em estado crítico em muitas áreas urbanas, o que leva a perdas na rede após o tratamento das águas; mudanças climáticas globais, que levam a eventos hidrológicos extremos; problemas na falta de ações na governabilidade de recursos hídricos (TUNDISI, 2008).

Segundo Latuf (2007), é fundamental para a gestão de recursos hídricos, o conhecimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas e seus regimes de variação de vazões e, principalmente, as relações entre os agentes econômicos e socioambientais presentes ao longo de toda a área de contribuição da bacia.

Sendo assim, existem situações em que é necessário que os volumes de água disponíveis sejam compatíveis com as necessidades específicas em um determinado momento. Os mecanismos de alocação de água objetivam fornecer água aos atuais e futuros usuários, além de atender às demandas ambientais, compatibilizando ofertas e demandas de água, e podem operar por meio de orientações do poder público; de processos de negociação entre usuários de água; de conceitos técnicos, como os limites de utilização de corpos hídricos; ou econômicos,

como a cobrança pelo uso da água (LOPES; FREITAS, 2007). Para a aplicação destes mecanismos, torna-se importante o uso de ferramentas computacionais que disponibilizem dados da bacia hidrográfica para acesso rápido e que, além disso, possibilitem a avaliação de cenários atuais e futuros (PORTO; PORTO, 2008).

De acordo com Goes (2012), a representação dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, por meio de modelos, é fundamental para o planejamento dos recursos hídricos, visto que, a partir desses modelos é possível entender os processos naturais e analisar a resposta do sistema para diferentes cenários, permitindo assim a tomada de decisão.

### **2.3 Dinâmica de sistemas**

A Dinâmica de Sistemas foi criada por Jay Forrester e associa a estrutura de um sistema com o seu comportamento ao longo do tempo a partir de simulação computacional (FORRESTER, 1961). Esta metodologia se baseia na teoria de servomecanismos e na Teoria Geral dos Sistemas (BERTALANFFY, 1975) e, a princípio, era utilizada no meio industrial, sendo posteriormente aplicada em outras áreas como, economia, ecologia e recursos hídricos.

A dinâmica de sistemas é baseada na teoria de retroalimentação, e procura explicar as características dos sistemas, com base nos padrões de comportamento entre as partes, visto que em um sistema as partes influenciam umas às outras de forma mútua (GRATULIANO, 2012).

Os componentes que formam um modelo são: estoques, fluxos, conversores e conectores. Os estoques são variáveis de estado, que se acumulam no sistema, e podem ser modificadas pelas variáveis de controle, que são chamadas de fluxos. Os conversores alteram os fluxos ao longo do tempo, enquanto os conectores indicam a direção de influência entre as estruturas (SOUZA, 2009).

Ao analisar os recursos hídricos, os estoques representam os acúmulos de água na superfície, na subsuperfície e no subsolo, e os fluxos resultam de decisões sobre um sistema, afetando os estoques, sendo neste caso representados pelas taxas de captação de água superficial e, ou, água subterrânea (VIEIRA et al., 2008).

Ainda de acordo com Vieira et al. (2008), na criação de diagramas de influência são utilizadas setas para indicar a direção de causalidade entre as variáveis, e os sinais positivo ou negativo. Se há uma relação de causalidade direta entre as variáveis, é utilizado o sinal positivo; já, se a relação for oposta, o sinal é negativo. Uma situação de retroalimentação (*feedback*) existe quando um estoque é influenciado por seu estado no passado, e, assim como em um diagrama de influência, quando o aumento de uma variável ocasionar um aumento na mesma

variável futuramente, a retroalimentação será positiva, e quando o aumento de uma variável levar a um decréscimo desta mesma variável no futuro, a retroalimentação será negativa.

Devido a essa interação dos efeitos de retroalimentação positivos e negativos, os sistemas são estabilizados, o que pode resultar em comportamentos assintóticos ou oscilatórios. Esses resultados também podem ser não-lineares, o que torna difícil a previsão dos efeitos de mudanças em determinadas variáveis sobre o comportamento do sistema (BRAGA et al., 2004).

Galarza et al. (2015) afirma que, a partir da modelagem da dinâmica de sistemas, é possível estudar sistemas complexos considerando todos seus elementos constituintes simultaneamente. Como propôs Jay Forrester, a dinâmica de sistemas permite expressar as cadeias de eventos circulares existentes na natureza por meio de diagramas causais, fluxos e estoques (VILLELA, 2007), assim, problemas relacionados com a gestão de recursos hídricos podem ser representados de forma dinâmica (WINZ et al., 2009).

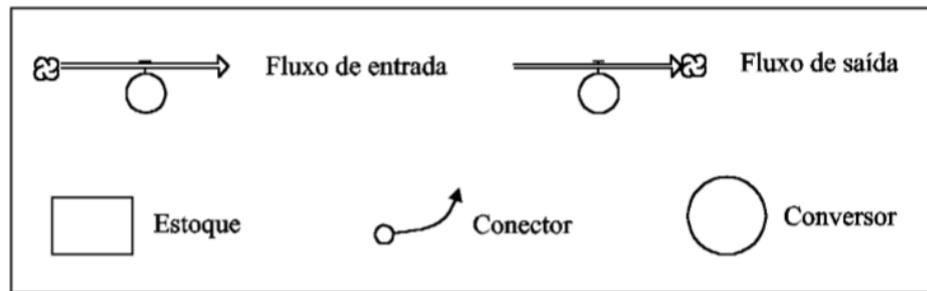
Li et al. (2018) desenvolveu um modelo de dinâmica de sistemas para avaliar a situação dos recursos hídricos em Zhengzhou, na China. Öztürk et al. (2013) modelou, por meio da dinâmica de sistemas, o impacto das mudanças de uso do solo na hidrologia de uma bacia rural na Turquia. Li et al. (2017) combinou a dinâmica de sistemas com a pegada ecológica para construir um modelo de desenvolvimento ecológico sustentável em Chengdu, na China. Tian et al. (2020) desenvolveu um modelo de dinâmica de sistemas acoplado à qualidade e quantidade de água, para avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na cidade de Tianjin, na China. Schiavon (2016) avaliou o Índice de Sustentabilidade dos recursos hídricos no município de Promissão (SP) fazendo o uso do pensamento sistêmico.

### **2.3.1 Software STELLA**

O software *Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation* - STELLA é uma ferramenta computacional por meio da qual é possível transformar modelos mentais em diagramas computadorizados, permitindo a simulação de situações reais de sistemas ecológicos dinâmicos, fazendo o uso de funções matemáticas, onde as saídas são representadas de forma gráfica (SOUZA, 2010).

Ainda de acordo com Souza (2010), o software STELLA é fundamentado na metáfora do tanque e da torneira, e por meio da conexão dos elementos básicos no formato de ícones, é possível construir modelos. Os principais ícones do software STELLA são: estoque, fluxo, conversor e conector, e podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Principais ícones do software STELLA.



Fonte: HPS (2001).

Os estoques armazenam os valores dos componentes, e são alterados ao longo do tempo pelos fluxos, que representam a entrada e saída de dados do estoque. A variação dos valores dos fluxos é dada em relação ao tempo por meio dos conversores, e as setas, ou conectores, indicam o sentido que as informações devem seguir (SCHIAVON, 2016).

Para a simulação no STELLA, primeiramente são inseridos os componentes do sistema e as relações entre estes. São então geradas equações diferenciais, que são matematicamente resultantes ao longo de um período por um algoritmo que gera comportamentos dependentes do tempo para as variáveis contidas no modelo (SOUZA et al., 2010).

Por meio das simulações geradas pelo STELLA, pode-se obter uma base para políticas de otimização do armazenamento de água durante períodos em que há um escoamento maior, sendo que este pode servir de abastecimento em períodos de seca (TAPIA et al., 2014).

Tapia et al. (2014) simulou, por meio do STELLA, os impactos das mudanças climáticas no balanço hídrico para a bacia do rio Yaqui em Sonora, no México. Oni et al. (2012) utilizou o software STELLA para simular os impactos das mudanças climáticas e opções de gerenciamento do fluxo de energia no reservatório de Steephill Falls, em Ontário, no Canadá. Souza et al. (2010) avaliou o comportamento dos recursos hídricos na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, considerando cenário de mudança climática, fazendo o uso do software STELLA. Sánchez-Román et al. (2012) simulou a oferta e a demanda de água nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá por meio do STELLA, considerando diferentes políticas de gestão dos recursos hídricos. Orellana González et al. (2008) avaliou a sustentabilidade dos recursos hídricos no município de São Miguel do Anta (MG) utilizando o STELLA, onde foram atribuídos diferentes cenários de mudanças climáticas e práticas de irrigação.

### **2.3.2 Calibração e validação**

Existem etapas de grande importância no processo de simulação, que definem sua validade e a revisão dos fenômenos a serem representados. Uma dessas etapas é a calibração, onde o modelo é ajustado, tendo seus parâmetros determinados, comparando-se diretamente com dados históricos. Outra etapa é a validação, onde o modelo é simulado com os parâmetros anteriormente ajustados. A validade do ajuste é verificada a partir da simulação e comparação com dados do histórico (CAVALCANTE, 2017).

Na Dinâmica de Sistemas a validação de um modelo é fundamental para garantir sua funcionalidade, visto que o modelo criado deve representar cenários do mundo real com base em uma visão sistêmica do processo, onde podem ser identificados problemas e soluções para melhorar os resultados (SCHIAVON, 2016). Ainda de acordo com Schiavon (2016), a calibração é necessária para garantir que os dados gerados pelo modelo condizem com a realidade, sendo essencial contextualizar o problema a ser analisado o mais próximo da realidade.

De acordo com Orellana González (2006), o objetivo principal do processo de validação de um modelo baseado em Dinâmica de Sistemas é estabelecer a sua validade estrutural com respeito aos objetivos para que ele fora construído, visto que a intenção desse método é servir de base para a avaliação de diferentes estratégias e políticas que permitam melhorar o desempenho do sistema.

Vale lembrar que nenhum modelo pode ser 100% validado, visto que não é possível quantificar precisamente todas as variáveis, e que as suposições do comportamento dos parâmetros avaliados podem diferir da realidade (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006).

### **2.4 Modelagem hidrológica**

A modelagem hidrológica pode ser definida como uma representação dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Modelos hidrológicos podem representar matematicamente processos físicos como, transformação de chuva em escoamento, evapotranspiração, armazenamento de água no solo e aquíferos, e propagação de ondas de cheias ao longo da rede de drenagem de bacias hidrográficas (PONTES et al., 2015).

Os modelos hidrológicos estão sendo cada vez mais utilizados como ferramenta para a gestão de recursos hídricos e a tomada de decisão (BESKOW et al., 2016), e podem ser utilizados para diversos fins, como: geração de série sintética de vazões em cursos d'água não

monitorados, preenchimento de falhas em séries históricas, previsão de inundação em tempo real, estimativa de frequência de vazões de cheia, dimensionamentos hidrológicos de estruturas hidráulicas, análise de vazões de referência para outorga de uso da água, avaliação do impacto das mudanças climáticas e de uso do solo sobre os recursos hídricos, estudos sobre serviços ecossistêmicos de caráter hidrológico, vazão ecológica, entre outros (CALDEIRA et al., 2018).

Segundo Tucci (2005), um sistema é definido como qualquer estrutura que num determinado tempo de referência inter-relaciona-se com uma entrada ou estímulo de energia, e uma saída ou resposta de energia. Assim, a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado, havendo perdas intermediárias por evapotranspiração e infiltração (SILVEIRA, 2007).

A disponibilidade hídrica de uma bacia é avaliada com base em séries históricas de vazões, que dependem de características como, precipitação, evapotranspiração e uso do solo na bacia. Modelos hidrológicos associados a modelos climáticos podem resultar em uma projeção futura de vazões. Assim, a modelagem é utilizada para atingir uma grande representatividade entre o que é observado na bacia e o que é previsto por modelos em situações semelhantes (RICARDO; NETO, 2016).

Por meio da modelagem hidrológica é possível verificar a consistência das informações disponíveis nas bacias hidrográficas, sendo que, os modelos hidrológicos são calibrados, e podem ser utilizados como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas (SANTOS, 2009). Assim, a modelagem hidrológica se torna uma importante ferramenta de gestão de recursos hídricos, visto que os modelos podem representar os processos físicos de um sistema, e gerar informações que normalmente não estão disponíveis (ANDRADE et al., 2016).

#### **2.4.1 Modelo hidrológico SWAT**

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*, com o objetivo de prever o impacto das alterações no uso, no tipo e no manejo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água em bacias hidrográficas (REUNGSANG et al., 2009).

Segundo Neitsch et al. (2005), o SWAT se caracteriza, principalmente, por: ser um modelo de base física que requer informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo e gerenciamento da terra; ser capaz de simular bacias de diferentes tamanhos, onde são estabelecidos diferentes cenários e estratégias de manejo da terra,

por longos períodos, com baixo investimento de capital e tempo; além de ser um modelo contínuo no tempo, o que favorece assim, as simulações de longos períodos, até 150 anos (WINCHELL et al., 2007).

Para suas simulações, o modelo SWAT incorpora oito componentes principais, sendo eles: a hidrologia; o aporte de sedimentos; o clima; a temperatura do solo; o crescimento vegetal; os nutrientes; os pesticidas e bactérias; e as práticas agrícolas (DHAR, 2009).

Em sua abordagem, com base no tipo de solo, relevo e no uso e ocupação do solo, a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias e estas em unidades de resposta hidrológica (HRU, do inglês *Hydrological Responses Unities*). Cada elemento, plano ou canal pode ter seu próprio conjunto de variáveis que os caracterizam adequadamente, assim, são preservados os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e as características homogêneas dentro da bacia (BALDISSERA, 2005).

De acordo com Neitsch et al. (2005), na HRU é representada a discretização de porções de áreas das sub-bacias em que há apenas uma classe de solo e um tipo de uso e manejo, sendo o escoamento superficial calculado para cada HRU, o que é interessante quando a bacia é heterogênea quanto ao uso do solo e às características pedológicas. Após calculados os fluxos de cada HRU, estes são agregados para computar o que é gerado por sub-bacia. Por fim, os resultados de cada sub-bacia são direcionados para as calhas dos rios de acordo com a rede de drenagem existente na bacia hidrográfica (NEITSCH et al., 2005).

Quanto aos dados de entrada do modelo, são necessárias informações espaciais, como o modelo digital de elevação, hidrografia, mapa de solos, mapa de uso do solo, e séries temporais de precipitação, vazão líquida, descarga sólida, temperatura mínima e máxima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (SOUZA et al., 2009). Ainda de acordo com Souza et al. (2009), é necessário um banco de dados relativo ao uso do solo, e também um banco de dados com informações a respeito do solo, como o número de camadas, grupo hidrológico, além de informações por camada de solo, como capacidade de água disponível, condutividade hidráulica saturada, porosidade, entre outras.

## **2.5 Modelagem e mudanças climáticas**

Mudanças climáticas podem ser definidas como modificações no estado do clima, que persistem por longos períodos de tempo, décadas ou séculos, e que são detectadas a partir de alteração na média e na variação das suas propriedades (*INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2007*).

Alterações climáticas podem ocorrer devido à intensificação do efeito estufa, ocasionado pelo aumento na concentração de gases na atmosfera, acelerado por ações antrópicas. De acordo com o IPCC (2007), se o ritmo atual de emissão de gases de efeito estufa continuar, podem ocorrer aumentos de temperatura importantes até 2100, ocasionando mudanças climáticas globais.

As mudanças mais significativas para o país são: o aumento de temperatura; modificações nos padrões de chuvas; e alterações na distribuição de extremos climáticos, tais como, secas, inundações, penetração de frentes frias, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo, entre outros (NOBRE, 2001).

Para se compreender a influência dos gases de efeito estufa no aquecimento ou resfriamento do planeta, é utilizado um índice chamado forçamento radiativo, que é expresso em watts por metro quadrado ( $W m^{-2}$ ) (IPCC, 2007).

No quinto relatório científico divulgado pelo IPCC (2013), foram levantados quatro cenários climáticos futuros com projeções até 2100, que demonstram as concentrações atmosféricas e suas forçantes radiativas antropogênicas por meio de Caminhos de Concentração Representativa, do inglês *Representative Concentration Pathways* (RCP), sendo estes equivalentes ao forçamento radiativo total em  $W m^{-2}$  até o ano de 2100.

Como afirma Rodrigues (2017), a projeção mais otimista é o RCP 2.6, visto que esta estabelece uma redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera até o final do século 21. Os RCPs 4.5 e 6.0 consistem em projeções médias de estabilização. Já a projeção mais pessimista, o RCP 8.5, implica em um acréscimo das emissões dos gases do efeito estufa até o final do século 21. Os RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5 representam, respectivamente, as forçantes radiativas de  $2,6 W m^{-2}$ ,  $4,5 W m^{-2}$ ,  $6,0 W m^{-2}$  e  $8,5 W m^{-2}$  (IPCC, 2013; JONES et al., 2013; VUUREN et al., 2011).

Segundo o IPCC (2013), com o uso de Modelos de Circulação Geral (GCMs, do inglês *General Circulation Models*) é possível realizar projeções climáticas, visto que estes modelos são capazes de simular a dinâmica dos sistemas terrestres. Tais modelos podem fornecer informações das mudanças climáticas globais, pois simulam o comportamento dos processos químicos e físicos na atmosfera, além de interagir com componentes de outros sistemas (CHOU et al., 2014). Os GCMs levam em conta variações da concentração de gases do efeito estufa, sendo, portanto, uma das ferramentas científicas mais avançadas na simulação do clima (MELLO et al., 2015).

O Modelo de Investigação Interdisciplinar sobre o Clima (MIROC) é um modelo japonês, desenvolvido em cooperação pela Universidade de Tóquio, NIES e JAMSTEC, que

apresenta modelos oceânicos e de superfície continental. Já o HadGEM2-ES, que foi desenvolvido pelo Hadley Centre (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011), é um modelo do sistema terrestre, e representa o ciclo do carbono. Este modelo inclui a química da atmosfera e um modelo de aerossol com a representação do carbono orgânico e da pluma de poeira (RODRIGUES, 2017).

Segundo Collins et al. (2011), a resolução do modelo HadGEM2-ES é de 1,875° de longitude e 1,275° de latitude, com uma altitude de até 40 km. Já o MIROC5, apresenta uma resolução de 150 km na horizontal e 40 níveis na vertical (CHOU et al., 2014).

As projeções dos GCMs possuem resolução espacial grosseira para avaliações de impacto e, para escalas regionais, sendo assim, estas são refinadas por Modelos Climáticos Regionais – RCMs, do inglês *Regional Climate Models* (MARAUN et al., 2017). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveu no Brasil, produtos de *downscaling* com o RCM Eta, sob os cenários RCP 8.5 e 4.5 dos GCMs HadGEM2-ES e MIROC5, como forma de apoio a estudos estratégicos de mudanças no clima e ao Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas (ALMAGRO; OLIVEIRA, 2019).

## 2.6 Agricultura e mudanças climáticas

A agricultura é altamente dependente de fatores climáticos, e, portanto, a produção agrícola pode ser afetada por alterações no clima. O aumento da temperatura e alterações no regime pluviométrico podem beneficiar ou prejudicar as culturas.

O estresse hídrico, ocasionado pelo estresse climático, nas plantas pode aumentar devido à baixa umidade, aumento da temperatura, ventos fortes e alta intensidade luminosa (GONDIM et al., 2008). Já o aumento do CO<sub>2</sub>, pode acelerar o crescimento e a produtividade das culturas, pois pode induzir o fechamento dos estômatos das plantas e, assim, reduzir perdas de água por transpiração (TUBIELLO; EWERT, 2002). Porém, em níveis excessivos, a concentração de CO<sub>2</sub> passa a ser fitotóxica (GUEDES, 2009).

De acordo com o IPCC (2001), as vantagens não compensam os impactos globais causados pelo CO<sub>2</sub>. Além disso, para a adaptação das culturas às mudanças climáticas, podem ser necessários ajustes nas épocas de plantio e colheita, fertilizantes e irrigação, o que aumenta os custos de produção.

Segundo a Embrapa (2008), o aquecimento global pode levar a uma perda de R\$ 14 bilhões nas safras de grãos em 2070, alterando a geografia da produção agrícola no Brasil, podendo haver o deslocamento de plantações para áreas onde não há sua ocorrência.

Visto que, com alterações climáticas, a demanda por água de irrigação pelas culturas pode aumentar, os recursos hídricos de uma bacia podem ser afetados. A partir de modelos matemáticos, é possível simular a produtividade e a demanda de irrigação de culturas agrícolas, tendo em vista alterações climáticas, permitindo assim, que sejam tomadas medidas de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e de adaptação das culturas.

### **2.6.1 Modelo AquaCrop**

Os modelos de cultura são ferramentas importantes que preveem a produtividade das culturas sob diferentes condições climáticas, podendo assim serem utilizados para avaliar os impactos das mudanças climáticas na produtividade e demanda hídrica das culturas.

Um exemplo de modelo de cultura é o AquaCrop, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO. Este modelo simula a resposta ao rendimento de culturas herbáceas, sendo adequado para abordar condições em que a água é um fator chave limitante da produção agrícola (FAO, 2018).

De acordo com Steduto et al. (2009), o AquaCrop simula a resposta do rendimento de uma cultura específica ao estresse hídrico, durante todo o período de crescimento. Na simulação desse processo de crescimento, primeiramente, para calcular a transpiração, é simulado o desenvolvimento do dossel; e, para calcular a extração de água do solo, é simulada a expansão das raízes sob as condições ambientais especificadas durante o ciclo da cultura.

Ao longo da simulação, o AquaCrop calcula a quantidade de água necessária para evitar o estresse hídrico da cultura. O usuário deve entrar com um limiar para a depleção da água na zona de raízes, e, quando esse limiar for superado, uma pequena quantidade de água de irrigação será armazenada no perfil do solo para manter a depleção da água acima do limiar especificado. A quantidade total de água requerida será a demanda líquida para irrigação para o período de simulação (CASTILLO, 2016).

Uma das vantagens desse modelo é o número reduzido de parâmetros de entrada, que são 33, sendo estes facilmente observados no campo, como, a percentagem de cobertura do dossel e outros insumos fisiológicos relacionados à biomassa (TODOROVIC et al., 2009). Além dos parâmetros de entrada serem reduzidos, o modelo apresenta um número significativo de dados de saída, como a simulação da cobertura do dossel, biomassa e componentes da água do solo ao longo de todo o período de crescimento, e até a colheita final (RAES et al., 2009).

### 2.6.2 Calibração e validação

Na fase de calibração do modelo AquaCrop são ajustados alguns parâmetros de forma a obter a melhor aproximação entre os dados simulados e os dados observados, o que é feito a partir de análises estatísticas.

De acordo com Alencar (2014), a forma mais utilizada para a parametrização é, primeiramente, executar simulações com dados obtidos na literatura ou de culturas similares, e em seguida, comparar os resultados simulados com dados experimentais. Então, deve-se ajustar os parâmetros, executar a simulação e comparar, e repetir esse procedimento até serem obtidos os melhores resultados para os índices estatísticos.

Ainda segundo Alencar (2014), os principais parâmetros do modelo podem ser aplicados para a maioria das culturas, sendo estes conservativos, como aqueles relacionados aos limites de temperatura do ar para o crescimento, transpiração da cultura, crescimento do dossel, estresse hídrico e produção da biomassa. Outros parâmetros são específicos de cada cultura e do seu manejo (ALENCAR, 2014).

### 2.7 A bacia do rio Palma

A bacia hidrográfica do rio Palma (BHP) está localizada na região sudeste do estado do Tocantins, tendo como principais limites os estados da Bahia (Leste) e Goiás (Sul), e a bacia do rio Manuel Alves (Norte), desaguando no rio Paranã (Oeste). A Serra Geral é um dos divisores de águas da bacia (SEMARH, 2007).

São 12 os municípios que fazem parte da BHP, sendo eles: Arraias, Aurora do Tocantins, Combinado, Conceição do Tocantins, Dianópolis, Lavandeira, Novo Alegre, Novo Jardim, Paranã, Ponte Alta do Bom Jesus, Taguatinga e Taipas do Tocantins. Estes municípios são de pequeno porte no que diz respeito à população, sendo que todos eles têm menos de 20.000 habitantes, distribuídos na área urbana e rural, e apresentam pouco crescimento, com taxas próximas de zero ou negativas (SEMARH, 2007).

O clima na bacia do rio Palma é classificado, de acordo com Thornthwaite e Matter, em dois tipos, sendo eles: B1wA'a', que representa um clima úmido, com deficiência de água moderada no inverno, megatérmico; C2wA'a', que representa um clima subúmido, com deficiência de água moderada no inverno, megatérmico (SOUZA, 2016).

A precipitação média na bacia é de 1.440 mm por ano, sendo que o período seco ocorre de maio a setembro, onde os meses de junho e agosto apresentam valores menores que 5 mm,

e o período chuvoso apresenta valores acima de 200 mm entre novembro e março. Já a demanda evaporativa da atmosfera na BHP está em torno de 2.000 mm, que são distribuídos de forma equilibrada ao longo dos meses do ano (SEMARH, 2007).

De acordo com a SEMARH (2007), quanto ao uso do solo e cobertura vegetal, o bioma predominante na bacia é o Cerrado, ocupando uma área de 11.737,54 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 67,71% da área da bacia. A paisagem é formada por um extrato gramíneo contínuo com árvores e arbustos dispersos, o que representa uma transição entre floresta e campo.

O Cerrado é considerado uma das formações vegetais prioritárias para a conservação da biodiversidade do planeta. Como este ainda cobre 67% da área da bacia, e 11,4% é coberto por matas, pode-se concluir que a cobertura da bacia se encontra preservada. Porém, a pecuária vem se expandindo na bacia, sendo que 7,5% da área está ocupada por pastos e outras atividades relacionadas (SEMARH, 2007).

A partir dos registros da estação 21850000, que fica localizada no município de Paranã, em 95% do tempo o rio Palma apresenta uma disponibilidade de 119 m<sup>3</sup>/s, sendo a maior parte desta proveniente do sistema de águas subterrâneas Urucuia – Bambuí, no chapadão da Serra Geral (SEMARH, 2007).

Ao analisar dados fornecidos pela SANEATINS a respeito da água das captações para abastecimento, concluiu-se que os mananciais de abastecimento dos municípios da bacia apresentam águas com características físico-químicas e bacteriológicas que atendem, em sua maioria, aos padrões estabelecidos para classe 1 (SEMARH, 2007).

A produção agrícola na bacia do rio Palma está mais voltada para a subsistência, esse é o caso de culturas como o arroz e a mandioca, que exigem pouca especialização técnica. A cana-de-açúcar é uma das culturas mais expressivas na bacia, sendo que em 2005 a BHP foi responsável por 61,6 % da produção de cana do estado do Tocantins. Nesse mesmo ano, a produção de milho também foi expressiva, representando 17% da produção do estado (SEMARH, 2007).

O Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Palma (SEMARH, 2007) apresenta uma classificação de terras para fins de irrigação, tomando-se como base as principais características dos solos da bacia. Segundo a classificação, 36% da área total da bacia é boa para irrigação e 14% é regular.

A pecuária é significativa na bacia, e representa, historicamente, a principal atividade econômica, e a que mais ocupa o espaço, principalmente com relação à criação de bovinos. A produção de leite também é expressiva, esta existe em todos os municípios da bacia e é mais voltada para o mercado local e intrarregional (SEMARH, 2007).

A criação de aves é bastante expressiva em praticamente todos os municípios da bacia, sendo esta mais utilizada para consumo próprio. As criações de caprinos e ovinos também são atividades desenvolvidas na bacia, e voltadas para o consumo interno (SEMARH, 2007).

No que diz respeito ao abastecimento de água, a SANEATINS atende toda a demanda urbana da maioria dos municípios da bacia, já na zona rural são muito utilizados os poços amazonas, também chamados de cisternas, e as nascentes, sendo que durante as estiagens, estes se tornam vulneráveis.

Segundo a SEMARH (2018), na região sudeste do estado são observados longos períodos de ausência de chuva, onde há uma variabilidade significativa do início ao término da estação chuvosa, que compreende os meses de outubro a abril. A população rural sofre diversos transtornos durante esses períodos no que diz respeito ao abastecimento para consumo e produção da agricultura familiar.

Ainda de acordo com a SEMARH (2018), na bacia do rio Palma, a maior demanda é a agricultura irrigada, que é de aproximadamente 1,16 m<sup>3</sup>/s, o que representa 75% da demanda total, podendo vir a alcançar 16,89 m<sup>3</sup>/s, ou 96% da demanda, no cenário futuro em 2028. A segunda maior demanda é a pecuária, que representa aproximadamente 7% da demanda total, e em seguida aparece a população urbana com 2,5%. A demanda da população rural difusa (população rural e pecuária) passa por dificuldades de ser atendida durante os períodos de estiagem, que no ano de 2007 foi um dos mais rigorosos já registrados. Vale lembrar que a escassez hídrica identificada nessa bacia sofre muito mais influência da falta de infraestrutura adequada do que da insuficiência de água na calha principal do rio Palma.

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A gestão de recursos hídricos, para ser eficaz, deve ser baseada no recorte de bacia hidrográfica, incorporando assim, os diversos componentes políticos, econômicos e sociais. Fatores como a urbanização, mudanças climáticas e problemas de infraestrutura podem contribuir para a escassez de água, tornando-se assim necessário o uso de mecanismos que possibilitem que a oferta atenda à demanda dos usuários, como a alocação de recursos hídricos.

Para a aplicação destes mecanismos torna-se necessário o uso de ferramentas para a simulação de cenários atuais e futuros. Uma dessas ferramentas é a dinâmica de sistemas, utilizada no software STELLA, por meio da qual é possível expressar as cadeias de eventos que existem na natureza, a partir de funções matemáticas, o que permite que problemas relacionados à gestão de recursos hídricos sejam simulados de forma dinâmica.

Mudanças climáticas globais podem ocorrer devido à intensificação do efeito estufa, levando a alterações na temperatura, nos padrões de chuva e nos extremos climáticos. Modelos climáticos, juntamente com cenários futuros de emissão de gases, podem fornecer informações das mudanças climáticas globais, e, associados a modelos hidrológicos, como o SWAT, podem projetar o escoamento em diferentes cenários de mudanças climáticas, auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Alterações climáticas também podem afetar a produtividade e a demanda de água das culturas agrícolas, e, a partir de modelos de cultura, como o AquaCrop, é possível simular a influência desses fatores.

A bacia do rio Palma apresenta como principais demandas de água, a agricultura, seguida pela pecuária e a população. A região apresenta longos períodos de ausência de chuva, nos quais a população rural sofre diversos transtornos quanto ao abastecimento de água. A escassez hídrica na bacia sofre mais influência da falta de infraestrutura do que da insuficiência de água na calha principal do rio Palma.

De forma a auxiliar a tomada de decisão no que diz respeito à gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Palma, foi desenvolvido um modelo de dinâmica de sistemas, com o uso do software STELLA, para representar a oferta e demanda de água, e avaliar a sustentabilidade na bacia. Para simular alterações na demanda de irrigação das culturas foi utilizado o modelo AquaCrop. Tendo em vista avaliar cenários de mudanças climáticas, os dados de escoamento foram simulados no modelo SWAT com o uso de diferentes projeções climáticas.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. **Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014. 117p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S. Avaliação da precipitação simulada pelos modelos ETA/HADGEM2-ES e ETA/MIROC5 para o Brasil. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 71., 2019, Campo Grande. **Anais...**
- ANDRADE, C. W. L. et al. 2016. **Modelagem Hidrológica de uma sub-bacia do Alto Mundaú utilizando o modelo SWAT**. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste-ABRH, Aracajú, SE, Brasil, ABRH. p. 01-10.
- BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.
- BERTALANFFY, V. L. **Teoria geral dos Sistemas**. Petrópolis: Editora Vozes, 1975.
- BESKOW, S. et al. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, p. 2567-2578, 2016.
- BRAGA, J. L. et al. Modelagem com dinâmica de sistemas. In: SANTOS, M. L.; VIEIRA, W. C. **Métodos quantitativos em economia**. Viçosa: Editora UFV, 2004. p. 411-431.
- BRASIL. **Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm)>. Acesso em: junho de 2020.
- CALDEIRA, T. L. et al. Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 5, n. 1, p. 22-32, 2018.
- CARVALHO, A. P. V.; BRUMATTI, D. V.; DIAS, H, C, T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v. 2, n. 2., p. 148-156, 2012.
- CASTILLO, A. C. **Efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu, Rio Grande do Sul**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- CAVALCANTE, N. B. R. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e aferição de garantia física de uma central geradora hidrelétrica no rio Santana - RJ**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

- CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438-454, 2014.
- COLLINS, W. J. et al. Development and Evaluation of an Earth-System Model-HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336 p.
- DHAR, S.; MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 2394 - 2406, 2009.
- EMBRAPA. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil**. São Paulo, 2008. Disponível em: <[www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/aquecimentoglobal.pdf](http://www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/aquecimentoglobal.pdf)>.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Land & Water. AquaCrop**. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/Aquacrop/en/>>. Acesso em: julho de 2020.
- FORRESTER, J. W. **Urban Dynamics**. Cambridge: Pegasus Communication, 1961.
- GALARZA, L. H. W.; BONUMÁ, N. B.; FRANCO, A. C. L. Combinação de um modelo de dinâmica de sistemas e SIG na estimativa de perda do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais...**
- GOES, F. A. **Gestão de Reservatórios com Sistema de Apoio à Decisão Espacial: o Caso do Açude Castanhão**. 2012. 166 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- GONDIM, R. S. et al. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na Bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 43, n. 12, p. 1657-1664, 2008.
- GRATULIANO, J. **Pensamento sistêmico: 25 aplicações práticas**. Recife: Valença & Associados, 2012.
- GUEDES, I. M. R. **Mudanças climáticas globais e a produção de hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2009. 129 p.
- HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. [s.l: s.n.], v. 3, 2004.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Genebra, Suíça, 2001.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: Syntesis report**. Contribution of working group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra, Suíça. 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.

JONES, C. Twenty-first-century compatible CO<sub>2</sub> emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under four representative concentration pathways. **Journal of Climate**, Boston, v. 26, n. 13, p. 4398-4413, 2013.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. M. **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS/Labhidro, 3 ed. 242p, 2011.

LATUF, M. O.; CARMO, L. F. Z. Comportamento Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Riozinho do Rola, Município de Rio Branco/AC. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 2007. **Anais...**

LI, Y. et al. The study on ecological sustainable development in Chengdu. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 101, p. 112-120, 2017.

LI, Z. et al. A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in Zhengzhou City, China. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 50–60, 2018.

LIBARDI, P. **Dinâmica da água no solo**. [s.l: s.n.], 2005.

MARAUN, D. et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 764–773, 2017.

MARTIN, G. M. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, New York, v. 4, n. 4, p. 723-757, 2011.

MELLO, C. R. et al. Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 12, p. 8683–8698, 2015.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation**. Version 2005. Texas: Agricultural Research Service, 2005.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias estratégicas**, n. 12, 2001.

ONI, S. K. Dynamic Modelling of the Impact of Climate Change and Power Flow Management Options using STELLA: Application to the Steephill Falls Reservoir, Ontario, Canada. **Canadian Water Resources Journal**, v. 37, n. 2, 125-148, 2012.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. et al. Water resources sustainability at São Miguel do Anta county, Minas Gerais, Brazil: a system dynamics approach. **BioEng**, v.2, n.3, p. 231-241, 2008.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sostenibilidad de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais: un enfoque de dinámica de sistemas**. 2006. 104 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Modelo de Simulação Dinâmica para valoração ecológica de serviços ecossistêmicos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. 2010. 284 p. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ÖZTÜRK, M.; COPTY, N. K.; SAYSEL, A. K. Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 97–109, 2013.

PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, out./dez. 2015.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, 2008.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial**. Viçosa-MG: Editora UFV, 2003. 88p.

RAES, D. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438-447, 2009.

REUNGSANG, P. et al. Calibration and validation of SWAT for the upper Maquoketa river watershed. **intern. J. Agric. eng.**, v. 16, p. 35-48, 2009.

RICARDO, G. S.; NETO, S. L. R. **Modelagem hidrológica chuva-vazão da bacia hidrográfica do alto canoas por meio do modelo hec-hms (hydrologic modeling system)**. Seminário de iniciação científica - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016.

RODRIGUES, J. A. M. **Impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do rio Tocantins**. 2017. 128 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. et al. Simulação da oferta e demanda de recursos hídricos nas bacias dos rios Piracicaba, Capivarí e Jundiáí: uma análise em dinâmica de sistemas. **Irriga, Botucatu**, v. 17, n. 3, p. 284 - 298, julho - setembro, 2012.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 29, n. 4, p. 578-590, 2009.

SANTOS, J. Y. G. et al. Aplicação do modelo SWAT para a simulação chuva-vazão na Bacia do Rio Tapacurá, Estado de Pernambuco. **Anais Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves, RS, Brasil, p. 01-08, 2013.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 2, n. 03, p. 01-19, 2009.

SCHIAVON, A. R. B. **Índice de sustentabilidade dos recursos hídricos por meio do pensamento sistêmico no município de Promissão, SP**. 2016. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMARH. **Constituição da Comissão Pró-Comitê de Bacias Hidrográficas do Rio Palma, 2018**. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/424706/>>. Acesso em: abril de 2020.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMARH. **Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Palma, 2007**. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/269425/>>. Acesso em: abril de 2020.

SILVA, D. M. C.; GRILLO, M. A aplicação da política dos 3 R's como estratégia competitiva e sustentável em empreendimentos hoteleiros. In: Congresso Paraibano de Gestão do “Lixo”: educação ambiental e sustentabilidade, 2009, Campina Grande, Universidade Estadual da Paraíba. **Anais...**

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, p. 35-51, 2007.

SOUZA, F. H. M. **Regionalização climática de Thornthwaite e Mather para o Estado do Tocantins**. 2016. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2016.

SOUZA, M. N. et al. 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, 2010.

SOUZA, M. N. et al. Dinâmica de sistemas e modelagem dos recursos hídricos da Bacia do Rio Preto com o uso do programa STELLA. **Revista Engenharia Na Agricultura**, v. 17, n. 5, p. 353-366, 2009.

SOUZA, M. N. et al. Software STELLA e o comportamento hidrológico na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, afluente do rio Paracatu, em cenário de mudança climática. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v.1, n.1, p.43-66, 2010.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...**

STEDUTO, P. et al. Aquacrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

TAPIA, E. M. et al. Use of STELLA software for the modelling of climate change impacts on water balance for the rio Yaqui basin, Sonora, Mexico. **European Scientific Journal**, México, v. 10, n. 14, p. 351-360, 2014.

TIAN, Y. et al. Dynamic Model of a Sustainable Water Resources Utilization System with Coupled Water Quality and Quantity in Tianjin City. **Sustainability**, v. 12, p. 42-54, 2020.

TODOROVIC, M. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 509-521, 2009.

TUBIELLO, F. N.; EWERT, F. Stimulating the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops: approaches and applications for climate change. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 57-74, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, 2008.

VIEIRA, W. C. Dinâmica de sistemas aplicada à gestão de recursos hídricos em bacia hidrográfica. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 6, n. 3, p. 415-448, 2008.

VILLELA, P. R. C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. II SEMANA ACADÊMICA DA GESTÃO DO AGRONEGÓCIO. Viçosa: DER/UFV, 2007. 66p.

VUUREN, D. P. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, n. 5, p. 5-31, nov. 2011.

WINCHELL, M. et al. **ArcSWAT Interface for SWAT 2005 - User's guide**. Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory, 2007.

WINZ, I.; BRIERLEY, G.; TROWSDALE, S. The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. **Water Resour Manage**, 23, p. 1301-1323, 2009.

## Artigo 1 – Versão Preliminar

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A SUSTENTABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PALMA (TO)

## RESUMO

Fatores antrópicos e naturais podem afetar a disponibilidade de água em uma bacia, tornando-se necessário o uso de ferramentas que permitam a simulação de cenários futuros. Tendo em vista que mudanças climáticas futuras podem afetar os recursos hídricos, o objetivo deste estudo foi avaliar a sustentabilidade na bacia do rio Palma (TO), ao longo do século, em cenários de mudanças climáticas e de incremento da área irrigada. O escoamento futuro foi simulado por meio do SWAT, considerando os modelos climáticos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 e os cenários de emissão 4.5 e 8.5. A demanda de irrigação das culturas foi simulada por meio do AquaCrop. Tendo-se a oferta e as demandas de água futuras na bacia, foi criado um modelo no STELLA, onde foi simulado o Índice de Sustentabilidade, cujos resultados foram analisados estatisticamente por meio de testes de tendência e de correlação. O HadGEM 8.5 foi o cenário mais insustentável. Os cenários MIROC 4.5 e 8.5 apresentaram maior crescimento de meses insustentáveis ao longo do tempo. Foi observada tendência de redução do IS e aumento de meses insustentáveis na maioria dos cenários. Os resultados encontrados podem auxiliar na tomada de decisão dos gestores de recursos hídricos, promovendo a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na bacia.

**PALAVRAS-CHAVE:** AquaCrop; dinâmica de sistemas; gestão dos recursos hídricos; modelagem hidrológica; STELLA; SWAT.

## INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de água para as diversas atividades antrópicas, a sustentabilidade dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica pode ser afetada, visto que a demanda depende da disponibilidade dos recursos, que podem se tornar escassos. Fatores hidrológicos e climáticos, aliados a fatores antrópicos, como a urbanização e problemas na infraestrutura em sistemas de abastecimento, podem afetar a disponibilidade de água, situação que pode ser agravada pelo uso irracional dos recursos hídricos.

As disponibilidades hídricas limitadas também podem ser afetadas devido à distribuição geográfica e temporal inadequada ao atendimento às demandas, com isso torna-se necessário o uso de ferramentas de gestão dos recursos hídricos, como os mecanismos de alocação de água, que objetiva fornecer água aos atuais e futuros usuários, além de atender às demandas ambientais, compatibilizando ofertas e demandas de água, em alinhamento aos objetivos

estratégicos da gestão. Os mecanismos de alocação de água, podem operar por meio de orientações do poder público; de processos de negociação entre usuários de água; de conceitos técnicos, como os limites de utilização de corpos hídricos; ou econômicos, como a cobrança pelo uso da água (Lopes & Freitas 2007).

Têm-se buscado formas de aumentar a oferta de água para atender a demanda, evitando assim o estresse hídrico, em situações em que a demanda é maior do que a disponibilidade e capacidade de renovação em um certo local. Assim, o uso de ferramentas que permitam a simulação de cenários futuros, levando em conta os fatores que podem interferir nos recursos hídricos, torna-se importante para a gestão em uma bacia hidrográfica.

De acordo com Goes (2012), a representação dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, por meio de modelos, é fundamental para o planejamento dos recursos hídricos, visto que, a partir desses modelos é possível entender os processos naturais e analisar a resposta do sistema para diferentes cenários, permitindo assim a tomada de decisão.

Esta representação pode ser feita por meio de ferramentas, como o software *Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation* - STELLA, que utiliza a metodologia de dinâmica de sistemas. Segundo Fan et al. (2018), com a dinâmica de sistemas é possível representar sistemas complexos, e avaliar seu comportamento ao longo do tempo, assim, ambientes em que se necessita gerir os recursos hídricos podem ser modelados e simulados.

A escassez de monitoramento de vazão no local de interesse e a necessidade de simulação de alterações do sistema, têm levado ao desenvolvimento de modelos hidrológicos (Caldeira et al. 2018). Os modelos hidrológicos estão sendo cada vez mais utilizados como ferramenta para a gestão de recursos hídricos e a tomada de decisão (Beskow et al. 2016), e são adequados para avaliar diferentes cenários, como de mudanças climáticas. Um exemplo desses modelos é o *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT, que engloba componentes climáticos, do ciclo hidrológico, processos de erosão, e transporte de sedimentos e poluentes (Tan et al. 2020).

De acordo com informações levantadas pelo IPCC, se o padrão atual de emissão de gases de efeito estufa continuar, é provável que ocorram mudanças climáticas globais até o final do século. Essas alterações podem modificar a temperatura, padrão de chuvas e distribuição de extremos climáticos, podendo afetar assim os recursos hídricos em uma bacia.

Modelos de circulação global atmosfera-oceano acoplados (GCMs) são utilizados para projetar possíveis condições climáticas futuras, levando em conta cenários de maior e menor emissão de gases de efeito estufa. As projeções dos GCMs possuem resolução espacial grosseira

para avaliações de impacto e, para escalas regionais, sendo assim, estas são refinadas por Modelos Climáticos Regionais - RCMs (Maraun et al. 2017). Modelos hidrológicos associados a modelos climáticos podem resultar em uma projeção futura de vazões, auxiliando na gestão de recursos hídricos.

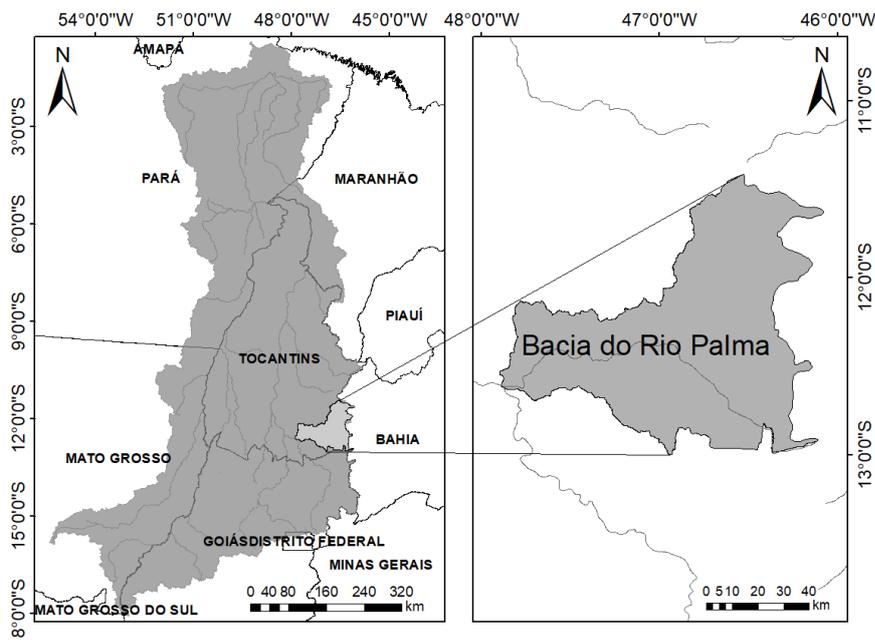
A partir do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a sustentabilidade dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Palma (TO), com o uso do software STELLA, considerando diferentes cenários de alterações na oferta, simulados por meio do modelo hidrológico SWAT associado a diferentes modelos e cenários climáticos; e também na demanda de água na bacia, ocasionados pela expansão da agricultura irrigada.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia do rio Palma (BHP), apresentada na Figura 1, que está localizada na região Sudeste do estado do Tocantins, e pertence ao Sistema Hidrográfico do rio Tocantins (margem direita). A região hidrográfica do rio Palma está localizada entre os paralelos Sul 13° 03' e 11° 24' e os meridianos de longitude Oeste 47° 53' e 46° 04'.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (à esquerda) e bacia hidrográfica do rio Palma (à direita).



Fonte: Do Autor (2021).

A bacia do rio Palma apresenta uma área de drenagem de 17.468 km<sup>2</sup>, e para sua delimitação tomou-se como seção de controle o posto fluviométrico de Barra do Palma, que fica localizado no Rio Palma, município de Paranã - TO (Rodrigues 2017).

### **Fontes de dados**

Para o cálculo das demandas de água na bacia, foram obtidos os dados dos censos populacionais e agropecuários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), das plataformas de Projeções da População, Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) e Produção Agrícola Municipal (PAM), além de dados referentes à irrigação, obtidos a partir de informações disponibilizadas pela Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ).

No software ArcGIS, tendo-se a delimitação da bacia do rio Palma e dos municípios localizados na bacia, foi feito um recorte, obtendo-se a área de cada município dentro da bacia. Em seguida, tendo-se o número de habitantes, animais e terra irrigada em cada município, foi estimado esse número para a área de cada município dentro da bacia, e feita a soma de todos os municípios, obtendo-se por fim, o número total de habitantes, animais e terra irrigada na bacia.

O consumo médio de água por habitante foi obtido a partir da Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA (2012), e o consumo de água pelos animais a partir do estudo de Matos (2003). A necessidade de água para a irrigação das culturas foi simulada fazendo-se o uso do software AquaCrop (Steduto 2009, 2012).

### **Processamento de dados**

No fluxograma da Figura 2, pode-se observar os passos que foram seguidos na simulação dos recursos hídricos na bacia do rio Palma. Rodrigues (2017) aplicou as projeções climáticas dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os cenários de emissão 4.5 e 8.5, no modelo SWAT para simular o escoamento e a evapotranspiração potencial na bacia. Os dados de evapotranspiração potencial gerados na etapa anterior foram utilizados como entrada no modelo AquaCrop que, a partir de seu uso, possibilitou a geração de dados de necessidade de água para a irrigação das culturas. Por fim, as demandas da irrigação, da pecuária, da população e ambiental, juntamente com o escoamento simulado pelo SWAT, foram utilizados como dados de entrada no software STELLA, para a simulação da oferta e demanda de água na bacia em cada cenário climático.

Figura 2 – Fluxograma das etapas seguidas para realização das modelagens e simulações.



Fonte: Do Autor (2021).

### Modelo hidrológico SWAT

Os dados futuros de escoamento e evapotranspiração potencial utilizados neste trabalho foram simulados utilizando o modelo SWAT por Rodrigues (2017), que avaliou em seu trabalho os impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do rio Tocantins, incluindo a bacia do rio Palma.

No trabalho de Rodrigues (2017), foram estimados os impactos das mudanças climáticas sobre o escoamento na BHP, a partir de simulações hidrológicas baseadas nas projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES. Essas projeções foram produzidas para o clima presente (1961-2005) e para os RCPs 4.5 e 8.5, ao longo do século XXI (2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099) com resolução de 20 km.

### Modelo AquaCrop

Para a simulação da necessidade de água para a irrigação das diferentes culturas, foi utilizada a versão 6.1 do software AquaCrop, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (Steduto 2009, 2012).

Os dados de entrada referentes ao clima, no AquaCrop, foram os de evapotranspiração potencial obtidos nas simulações feitas por Rodrigues (2017), por meio do modelo SWAT,

utilizando-se dos modelos de circulação global Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES, e os cenários de emissão 4.5 e 8.5 para cada modelo.

Foi escolhido um tipo de solo padrão apresentado pelo software, que consiste em um solo de textura média, com grande profundidade e sem entrada de água proveniente do lençol freático.

Foram analisadas as culturas mais expressivas na bacia de acordo com o último censo do IBGE, e consideradas as que em, para seu manejo, mais se utiliza a irrigação, sendo elas: cana-de-açúcar, feijão, milho, sorgo e soja. Com séries históricas provenientes da plataforma Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, avaliou-se a proporção de cada cultura considerada nos municípios da bacia ao longo dos anos. Diante da dificuldade de alocação das culturas dentro da área de estudo, optou-se por desconsiderar o efeito que esta alocação teria nos resultados, distribuindo aleatoriamente as culturas na bacia hidrográfica.

Optou-se pela separação das culturas entre anuais e perenes, sendo a cana-de-açúcar a única representante das culturas perenes. A utilização da cana-de-açúcar separadamente se deu pela importância que esta vem ganhando na região, e por seu comportamento singular quanto à demanda de água para a irrigação, em relação às demais culturas estudadas.

Foram então executadas simulações, e, para cada ciclo das culturas simulado, foi calculada a demanda líquida para irrigação, que representa o requerimento de água para irrigar a cultura sem considerar a eficiência do método de irrigação utilizado. Para a simulação no STELLA foi assumido um valor de 0,85 de eficiência, sendo este um valor médio considerando diferentes sistemas de irrigação. A demanda bruta foi obtida a partir da razão entre a demanda líquida e a eficiência da irrigação.

## **Software STELLA**

Neste estudo foi utilizada a versão 9.0 do software STELLA (STELLA 2001), que utiliza a metodologia de dinâmica de sistemas, e trabalha com variáveis físicas, econômicas e sociais. A construção do modelo foi estruturada por meio das etapas de: conceitualização; formalização; e simulação, que inclui a avaliação e a exploração.

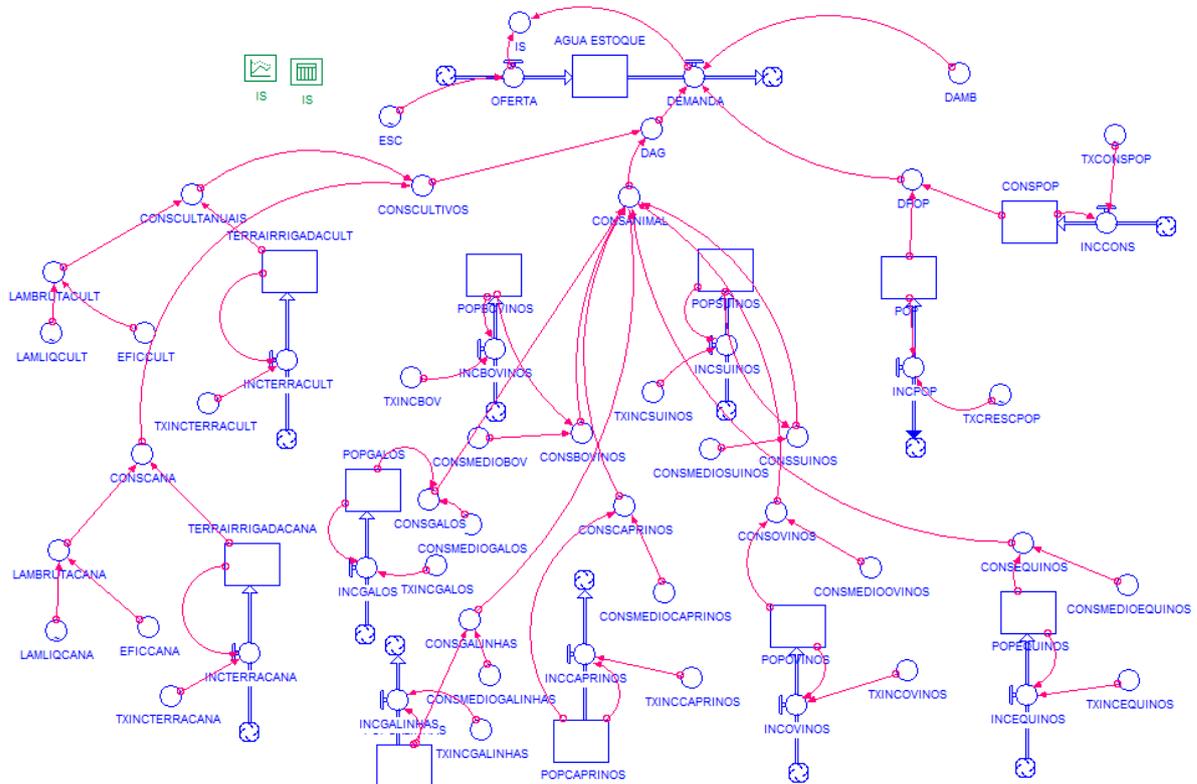
Na etapa de conceitualização, primeiramente, foi escolhido o horizonte de planejamento para as simulações, de 2007 a 2099, sendo a unidade de tempo o mês. Foi escolhido o ano de 2007 para o início das simulações, pois a partir deste ano não se tem dados de vazão disponíveis no posto fluviométrico localizado na bacia.

As demandas de água na bacia compreenderam: a doméstica (urbana e rural), agrícola, pecuária e ambiental. A demanda ambiental é aquela necessária para a proteção do meio ambiente e dos ecossistemas. No presente estudo foi assumida como demanda ambiental, a vazão mínima média mensal com 90% de probabilidade de ocorrência ( $Q_{90}$ ), observada em uma série de vazões, no período de 1961 a 2005.

Para o cálculo da demanda populacional, considerou-se as taxas de crescimento da população projetadas pelo IBGE para o estado do Tocantins ao longo do século e, para calcular a demanda agropecuária, foram consideradas as taxas de crescimento da agricultura irrigada e da pecuária observadas em dados disponibilizados pela Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ) e pela Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), respectivamente.

Após a etapa de conceitualização, têm-se a etapa de formalização do modelo empregando uma linguagem matemática. Para isso, foi elaborado um diagrama de estoque e fluxo (Figura 3), que descreve o funcionamento do sistema, a partir do qual são escritas as equações do modelo.

Figura 3 – Diagrama de estoque e fluxo da bacia hidrográfica do rio Palma.



Fonte: Do Autor (2021).

Um dos componentes inseridos no modelo foi o Índice de Sustentabilidade (Equação 1), apresentado por Xu et al. (2002), que considera a relação entre a disponibilidade de água e a oferta de água, e assim, permite avaliar a situação existente ao longo do tempo na bacia hidrográfica.

$$\begin{array}{ll} \text{Se OFERTA} > \text{DEMANDA} & \text{IS} = \frac{\text{OFERTA} - \text{DEMANDA}}{\text{OFERTA}} \\ \text{Se OFERTA} \leq \text{DEMANDA} & \text{IS} = 0 \end{array} \quad (1)$$

Se o IS for maior que 0,2, não há ou há pouco estresse hídrico na bacia, o que quer dizer que a demanda consome menos de 80% da oferta; se este for menor que 0,2, há vulnerabilidade, ou seja, a demanda consome mais que 80% da oferta; e se o IS for igual a zero a oferta não é suficiente para atender a demanda (XU et al. 2002).

Após a criação do diagrama de estoque e fluxo, foi feita a entrada de dados, como aqueles já simulados para a oferta, e os referentes às demandas, assim como as taxas de crescimento. Em seguida foi estabelecida a duração da simulação e a unidade de tempo. Por fim, foram executadas as simulações, obtendo-se o comportamento dos diversos componentes do modelo ao longo do tempo.

### **Validação do modelo**

O software STELLA permite, por meio de suas ferramentas de análise, a verificação de erros de sintaxe nas equações e a análise de coerência entre as unidades utilizadas no modelo. À medida que são estabelecidas as relações matemáticas, estas são verificadas automaticamente, e, se for detectado algum erro não é possível estabelecer a equação (Ortega & Ortega 2017). Foi utilizada a ferramenta *Check Units* em cada variável estabelecida e no modelo como um todo, a fim de verificar a coerência entre as unidades.

Para avaliar a consistência dimensional do modelo, foi verificada a equivalência da equação Oferta = Demanda + Estoque, assim como foi feito por Orellana González et al. (2008).

A validação também foi feita comparando-se o comportamento das variáveis do modelo, como as demandas populacional e agropecuária. À medida que cresce a população, por exemplo, cresce também a demanda por alimentos e conseqüentemente a área irrigada. Desta forma, espera-se, então, que as demandas populacional e agropecuária por água aumentem, o que foi verificado.

Para a validação do comportamento do modelo, os crescimentos populacional e agropecuário foram comparados com dados já existentes no período de 2006 a 2016. Os dados referentes à população foram comparados com dados de projeções do IBGE para o mesmo período. E os dados referentes à pecuária foram comparados com dados da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE. A comparação dos dados simulados e observados foi feita a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

### **Cenários avaliados**

Foram avaliados quatro cenários diferentes de expansão da área irrigada, visto que esta tem se destacado na bacia, apresentando um grande potencial para seu desenvolvimento nos próximos anos.

Primeiramente, foi considerada a taxa de crescimento média da área irrigada no Brasil nos últimos anos (3,8% ao ano), obtida a partir de dados disponibilizados pela ABIMAQ. Foi também atribuída uma taxa de crescimento da área irrigada de 8,5% ao ano, onde a área irrigada atinge 50% da área total da bacia, que segundo a Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH, é a porcentagem de terra da bacia apta à irrigação; e uma taxa de crescimento da área irrigada intermediária de 6% ao ano. Considerou-se ainda um cenário sem crescimento da área irrigada.

Para cada taxa de crescimento da área irrigada, foi simulado o Índice de Sustentabilidade considerando o escoamento gerado no SWAT por Rodrigues (2017), com base nas projeções climáticas dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 nos cenários de emissão 4.5 e 8.5. Sendo assim, foram avaliados no total 16 cenários.

### **Teste de correlação de Pearson**

Foram feitos testes de correlação, por meio do software XLSTAT em sua versão de teste, a fim de detectar correlações entre as variáveis do Índice de Sustentabilidade nos diferentes cenários avaliados.

Os testes de correlação são utilizados para calcular diferentes tipos de coeficientes de correlação, entre duas ou mais variáveis, e verificar se a correlação é significativa ou não. Neste trabalho foi escolhido o coeficiente de correlação de Pearson, que é adequado para dados contínuos e varia de 1 a -1. São calculados os valores-p, que permitem testar a hipótese nula de que os coeficientes são significativamente diferentes de zero (XLSTAT 2020).

## **Análise de Cluster Aglomerativa Hierárquica (AHC)**

No XLSTAT também foi feita a Análise de Cluster Aglomerativa Hierárquica (AHC), que é utilizada para formar grupos homogêneos de objetos com base em sua descrição por um conjunto de variáveis, ou a partir de uma matriz que descreve a semelhança entre os objetos (XLSTAT 2020). Um dos resultados gerados foi o dendrograma, que mostrou o agrupamento progressivo dos dados, assim, pôde-se ter uma ideia do número de classes em que os dados podem ser agrupados.

Para calcular a dissimilaridade entre os grupos foi utilizado o método de Ward (1963), este método agrega dois grupos de modo que a inércia dentro do grupo aumenta o mínimo possível para manter os grupos homogêneos. Este método pode ser utilizado apenas em casos com distâncias quadráticas, como a distância euclidiana, que foi utilizada neste trabalho.

## **Teste de Mann-Kendall**

Para verificar a existência de tendência nas séries de IS simuladas, foi utilizado o Teste de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975), que é um teste não paramétrico de tendência em série temporal. A hipótese nula  $H_0$  para este teste é de que não há tendência na série. Os testes de baseiam no cálculo do coeficiente de correlação tau de Kendall, que pode ser interpretado como a diferença entre as probabilidades de que as variáveis variem na mesma direção e as probabilidades de que as variáveis variem na direção oposta (XLSTAT 2020).

Foi considerado um nível de significância de 5%, assim a hipótese de ausência de tendência foi rejeitada quando o valor-p foi inferior ao nível de significância.

O teste de Mann-Kendall exige que as observações sejam independentes, ou seja, a autocorrelação não deve ser significativa, pois a variância da estatística S pode ser subestimada (XLSTAT 2020). Para verificar a existência de autocorrelação nas séries, foi escolhido o teste de Yue e Wang (2004), que tem um melhor desempenho quando há uma tendência e uma autocorrelação. Neste método é calculado o estimador de inclinação de Sen (Sen 1968), quanto mais próximo este for de 0, menor é a tendência, e o sinal indica se a tendência está aumentando ou diminuindo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

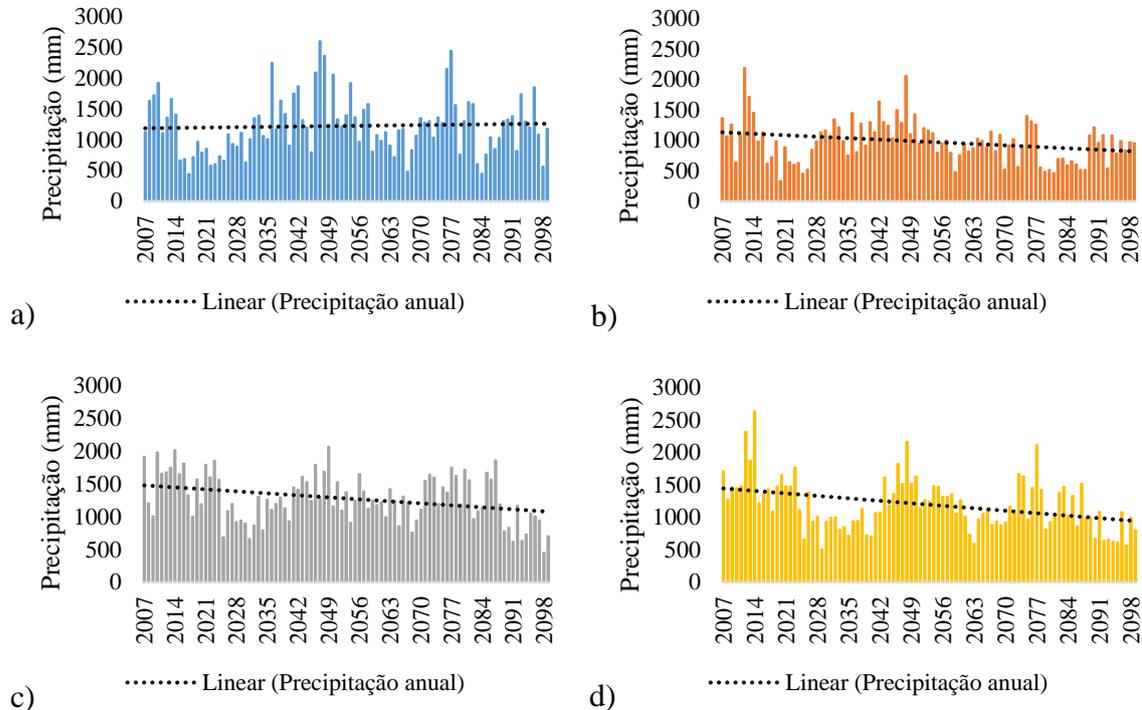
### Validação do modelo

Na comparação dos dados simulados a partir do STELLA, com os dados observados do IBGE, foi encontrado um coeficiente de correlação de Pearson de 0,8 para a pecuária, e de 0,95 para a população. De acordo com Vieira (2008), se o coeficiente de correlação estiver entre 0,75 e 1,00 a correlação entre as variáveis é forte, o que foi verificado.

### Simulação

O comportamento da precipitação ao longo do tempo, para os diferentes cenários climáticos, simulado por Rodrigues (2017) a partir do SWAT, está apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Precipitação anual nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d).



Fonte: Do Autor (2021).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as séries de precipitação referentes a cada cenário climático.

Tabela 1 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a precipitação anual nos cenários HadGEM 4.5, HadGEM 8.5, MIROC 4.5, MIROC 8.5.

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,051         | 0,303             | 1,486       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | -0,177        | <b>0,000</b>      | -3,147      |
| <b>MIROC 4.5</b>  | -0,212        | <b>&lt;0.0001</b> | -4,332      |
| <b>MIROC 8.5</b>  | -0,254        | <b>&lt;0.0001</b> | -5,351      |

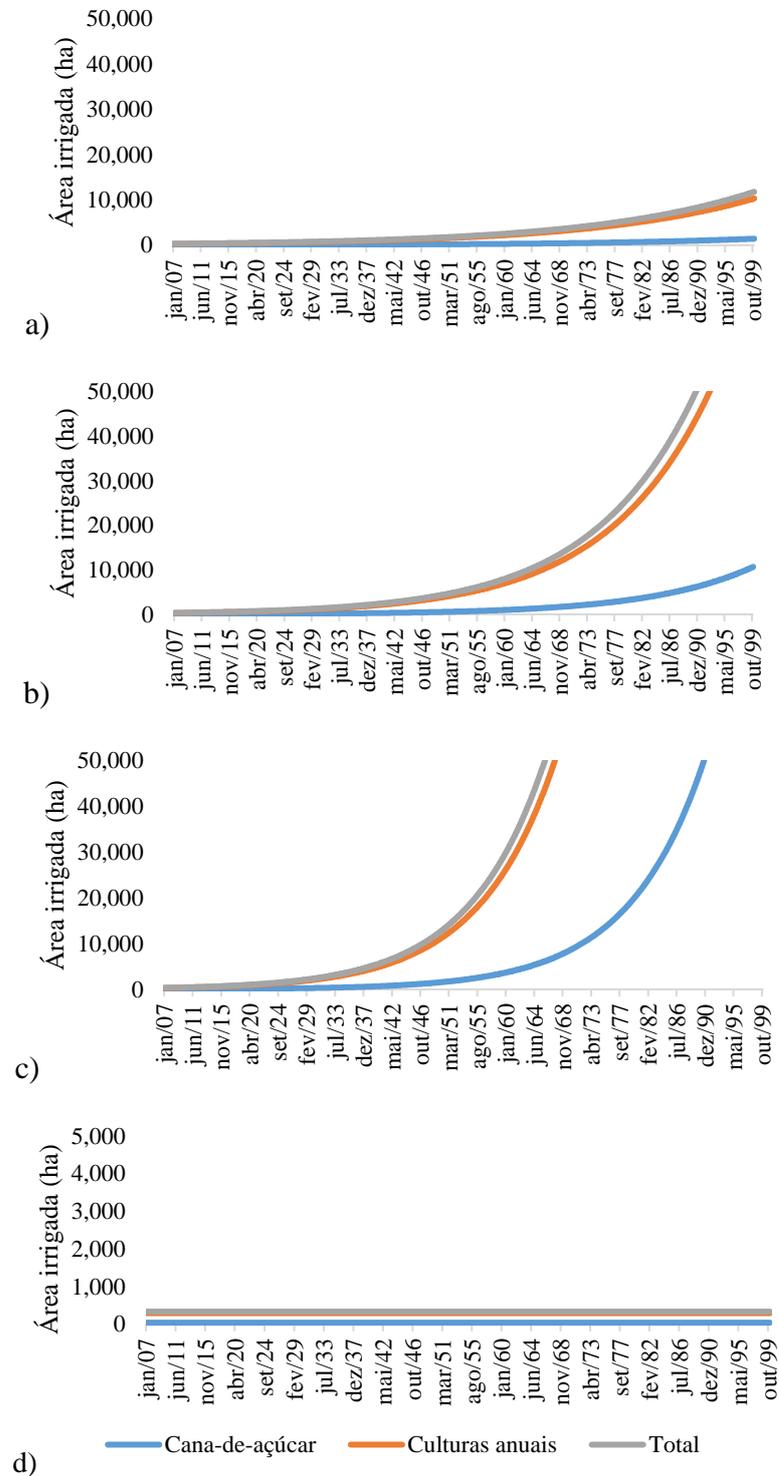
Fonte: Do Autor (2021).

Somente no cenário HadGEM 4.5 não foi observada tendência na série de precipitação, nos demais cenários houve tendência de redução da precipitação ao longo da simulação. Pode-se observar que nos cenários MIROC 4.5 e 8.5, a tendência é ainda maior, pois o valor-p é muito próximo de zero. Os gráficos da Figura 4 também mostram que o coeficiente angular da reta de tendência nos cenários MIROC 4.5 e 8.5 é maior, indicando maior redução da precipitação ao longo do tempo.

Para a verificação da existência de autocorrelação, o estimador de inclinação de Sen calculado apresentou valor negativo, o que indica que a tendência é de redução, e é maior nos cenários MIROC 4.5 e 8.5.

O comportamento da área irrigada obtido a partir do software STELLA, para as diferentes taxas de crescimento, ao longo do tempo de simulação, encontra-se na Figura 5.

Figura 5 – Área irrigada ao longo do tempo para as taxas de crescimento de 3,8% ao ano (a), 6% ao ano (b), 8,5% ao ano (c), e 0% ao ano (d).



Fonte: Do Autor (2021).

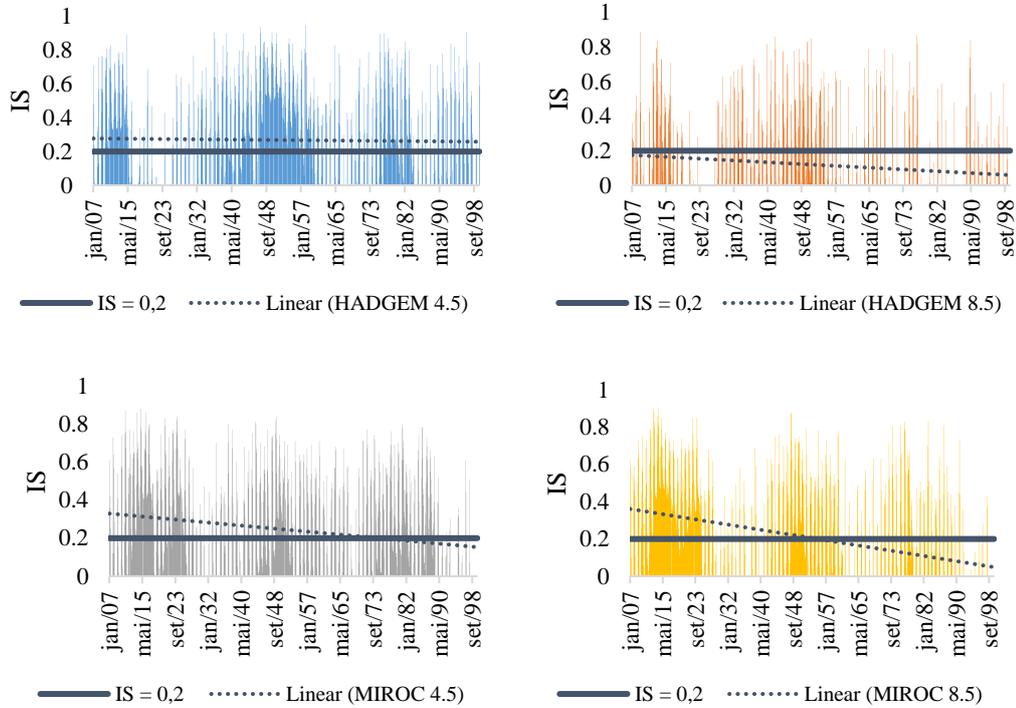
Ao considerar a taxa de crescimento de 3,8% ao ano, a área irrigada total atinge aproximadamente 12.000 hectares no final da simulação. Considerando a taxa intermediária de

6%, a área irrigada chega a quase 90.000 hectares em 2099, e ao considerar a taxa de 8,5%, a área irrigada atinge aproximadamente 900.000 hectares no final da simulação. Se não houver crescimento na área irrigada, esta se mantém próxima de 300 hectares.

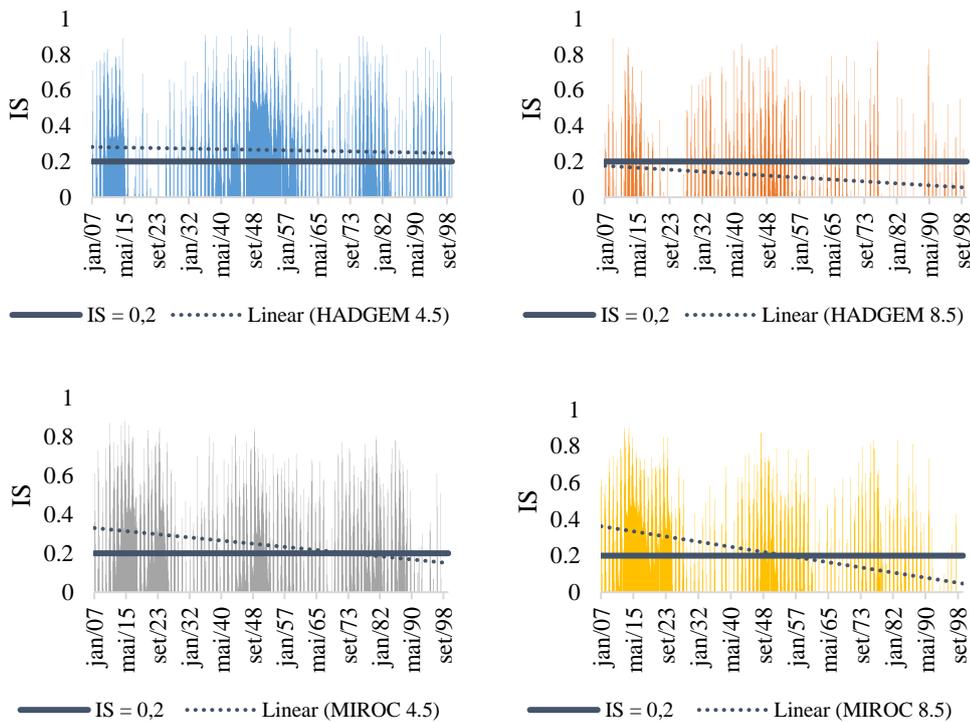
Na Figura 6, observa-se o IS em cada cenário climático para as taxas de crescimento da área irrigada de 3,8%, 6% e 8,5% ao ano, e sem expansão da área irrigada, respectivamente. Foi representada a linha do  $IS = 0,2$ , pois se este for menor que 0,2, há uma situação de vulnerabilidade dos recursos hídricos na bacia, ou seja, a demanda consome mais que 80% da oferta.

Figura 6 – Índice de sustentabilidade mensal para os cenários de expansão da área irrigada de 3,8% (a), 6% (b) e 8,5% ao ano (c), e sem expansão da área irrigada (d), nos diferentes cenários climáticos.

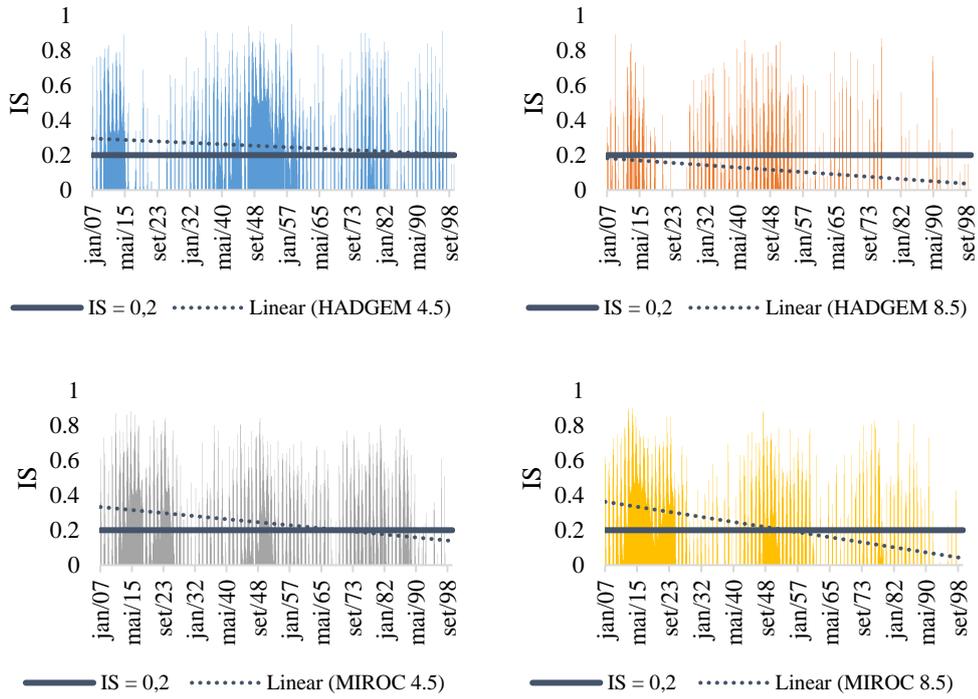
a)



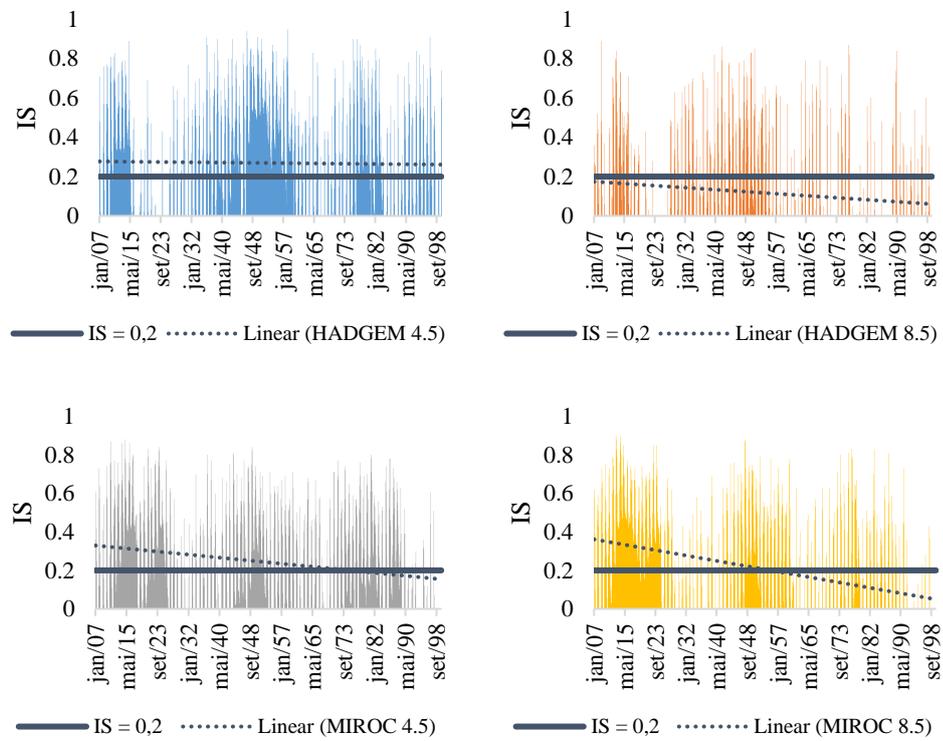
b)



c)



d)



Fonte: Do Autor (2021).

São apresentados na Tabela 2, o resumo dos resultados para o IS nos diferentes cenários climáticos em cada cenário de expansão da área irrigada.

Tabela 2 – Resumo dos resultados para os cenários de expansão da área irrigada de 3,8% (a), 6% (b) e 8,5% ao ano (c), e sem expansão da área irrigada (d), nos diferentes cenários climáticos.

a)

|   | HADGEM<br>4.5 | HADGEM<br>8.5 | MIROC<br>4.5 | MIROC<br>8.5 |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|
| IS máximo   | 0,95          | 0,89          | 0,88         | 0,9          |
| IS mínimo   | 0             | 0             | 0            | 0            |
| IS médio  | 0,27          | 0,12          | 0,24         | 0,20         |
| Mediana de IS                                       | 0,21          | 0,00          | 0,16         | 0,01         |
| Eventos com IS menor que 0,2                        | 548           | 861           | 590          | 666          |
| Desvio Padrão                                       | 0,28          | 0,21          | 0,25         | 0,25         |
| CV do IS  | 1,04          | 1,82          | 1,06         | 1,24         |
| Maior período consecutivo com IS < 0,2              | 35            | 58            | 24           | 47           |
| Maior período consecutivo com IS > 0,2              | 120           | 9             | 66           | 80           |
| Coefficiente angular dos modelos lineares ajustados | 0,0000006     | 0,000003      | 0,000005     | 0,000009     |

b)

|   | HADGEM<br>4.5 | HADGEM<br>8.5 | MIROC<br>4.5 | MIROC<br>8.5 |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|
| IS máximo   | 0,95          | 0,89          | 0,88         | 0,9          |
| IS mínimo   | 0             | 0             | 0            | 0            |
| IS médio  | 0,26          | 0,11          | 0,24         | 0,20         |
| Mediana de IS                                       | 0,19          | 0,00          | 0,16         | 0,01         |
| Eventos com IS menor que 0,2                        | 559           | 866           | 590          | 667          |
| Desvio Padrão                                       | 0,28          | 0,21          | 0,26         | 0,25         |
| CV do IS  | 1,06          | 1,84          | 1,06         | 1,24         |
| Maior período consecutivo com IS < 0,2              | 35            | 58            | 24           | 47           |
| Maior período consecutivo com IS > 0,2              | 120           | 9             | 66           | 80           |
| Coefficiente angular dos modelos lineares ajustados | 0,000001      | -0,000004     | -0,000005    | -0,000009    |

c)

|   | HADGEM<br>4.5 | HADGEM<br>8.5 | MIROC<br>4.5 | MIROC<br>8.5 |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|
| IS máximo   | 0,95          | 0,89          | 0,88         | 0,9          |
| IS mínimo   | 0             | 0             | 0            | 0            |
| IS médio  | 0,25          | 0,11          | 0,24         | 0,20         |
| Mediana de IS                                       | 0,12          | 0,00          | 0,14         | 0,00         |
| Eventos com IS menor que 0,2                        | 596           | 880           | 600          | 676          |
| Desvio Padrão                                       | 0,28          | 0,21          | 0,26         | 0,25         |
| CV do IS  | 1,13          | 1,92          | 1,09         | 1,27         |
| Maior período consecutivo com IS < 0,2              | 35            | 58            | 24           | 47           |
| Maior período consecutivo com IS > 0,2              | 119           | 9             | 66           | 80           |
| Coefficiente angular dos modelos lineares ajustados | -0,000003     | -0,000004     | -0,000006    | -0,000010    |

d)

|   | HADGEM<br>4.5 | HADGEM<br>8.5 | MIROC<br>4.5 | MIROC<br>8.5 |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|
| IS máximo   | 0,95          | 0,89          | 0,88         | 0,9          |
| IS mínimo   | 0             | 0             | 0            | 0            |
| IS médio  | 0,27          | 0,12          | 0,24         | 0,21         |
| Mediana de IS                                       | 0,21          | 0,00          | 0,16         | 0,01         |
| Eventos com IS menor que 0,2                        | 547           | 858           | 590          | 666          |
| Desvio Padrão                                       | 0,28          | 0,21          | 0,25         | 0,25         |
| CV do IS  | 1,04          | 1,82          | 1,05         | 1,24         |
| Maior período consecutivo com IS < 0,2              | 35            | 58            | 24           | 47           |
| Maior período consecutivo com IS > 0,2              | 120           | 9             | 66           | 80           |
| Coefficiente angular dos modelos lineares ajustados | 0,0000005     | -0,000003     | -0,000005    | -0,000009    |

Fonte: Do Autor (2021).

Observa-se que em todos os cenários de expansão da área irrigada, o HadGEM 8.5 apresentou menor IS médio, maior número de eventos com IS menor que 0,2, maior período consecutivo com IS < 0,2 e menor período consecutivo com IS > 0,2, o que indica que esse cenário apresenta maiores impactos aos recursos hídricos da bacia que os demais.

Comparando-se os cenários de expansão da área irrigada, nota-se uma redução na média e mediana do IS à medida que aumenta a taxa de crescimento da área irrigada, assim como, um aumento no número de eventos de IS < 0,2, o que indica que a expansão da área irrigada pode afetar os recursos hídricos da bacia, levando à sua insustentabilidade.

Na Tabela 3 é apresentada a matriz de correlação de Pearson para o IS nos diferentes cenários climáticos e de expansão da área irrigada.

Tabela 3 – Matriz de correlação de Pearson para os atributos do Índice de Sustentabilidade.

| Variables        | IS max       | IS mean       | IS median     | IS < 0.2 events | SD            | IS cv         | IS < 0.2 longest | IS > 0.2 longest | $\alpha$     |
|------------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------|
| IS max           | <b>1,00</b>  | <b>0,508</b>  | 0,464         | -0,456          | <b>0,673</b>  | -0,361        | -0,095           | <b>0,749</b>     | <b>0,536</b> |
| IS mean          | <b>0,508</b> | <b>1,00</b>   | <b>0,837</b>  | <b>-0,998</b>   | <b>0,965</b>  | <b>-0,981</b> | <b>-0,860</b>    | <b>0,918</b>     | 0,127        |
| IS median        | 0,464        | <b>0,837</b>  | <b>1,00</b>   | <b>-0,821</b>   | <b>0,738</b>  | <b>-0,756</b> | <b>-0,850</b>    | <b>0,663</b>     | <b>0,576</b> |
| IS < 0.2 events  | -0,456       | <b>-0,998</b> | <b>-0,821</b> | <b>1,00</b>     | <b>-0,953</b> | <b>0,991</b>  | <b>0,873</b>     | <b>-0,901</b>    | -0,078       |
| SD               | <b>0,673</b> | <b>0,965</b>  | <b>0,738</b>  | <b>-0,953</b>   | <b>1,00</b>   | <b>-0,928</b> | <b>-0,712</b>    | <b>0,987</b>     | 0,120        |
| IS cv            | -0,361       | <b>-0,981</b> | <b>-0,756</b> | <b>0,991</b>    | <b>-0,928</b> | <b>1,00</b>   | <b>0,875</b>     | <b>-0,870</b>    | 0,047        |
| IS < 0.2 longest | -0,095       | <b>-0,860</b> | <b>-0,850</b> | <b>0,873</b>    | <b>-0,712</b> | <b>0,875</b>  | <b>1,00</b>      | <b>-0,596</b>    | -0,119       |
| IS > 0.2 longest | <b>0,749</b> | <b>0,918</b>  | <b>0,663</b>  | <b>-0,901</b>   | <b>0,987</b>  | <b>-0,870</b> | <b>-0,596</b>    | <b>1,00</b>      | 0,113        |
| $\alpha$         | <b>0,536</b> | 0,127         | <b>0,576</b>  | -0,078          | 0,120         | 0,047         | -0,119           | 0,113            | <b>1,00</b>  |

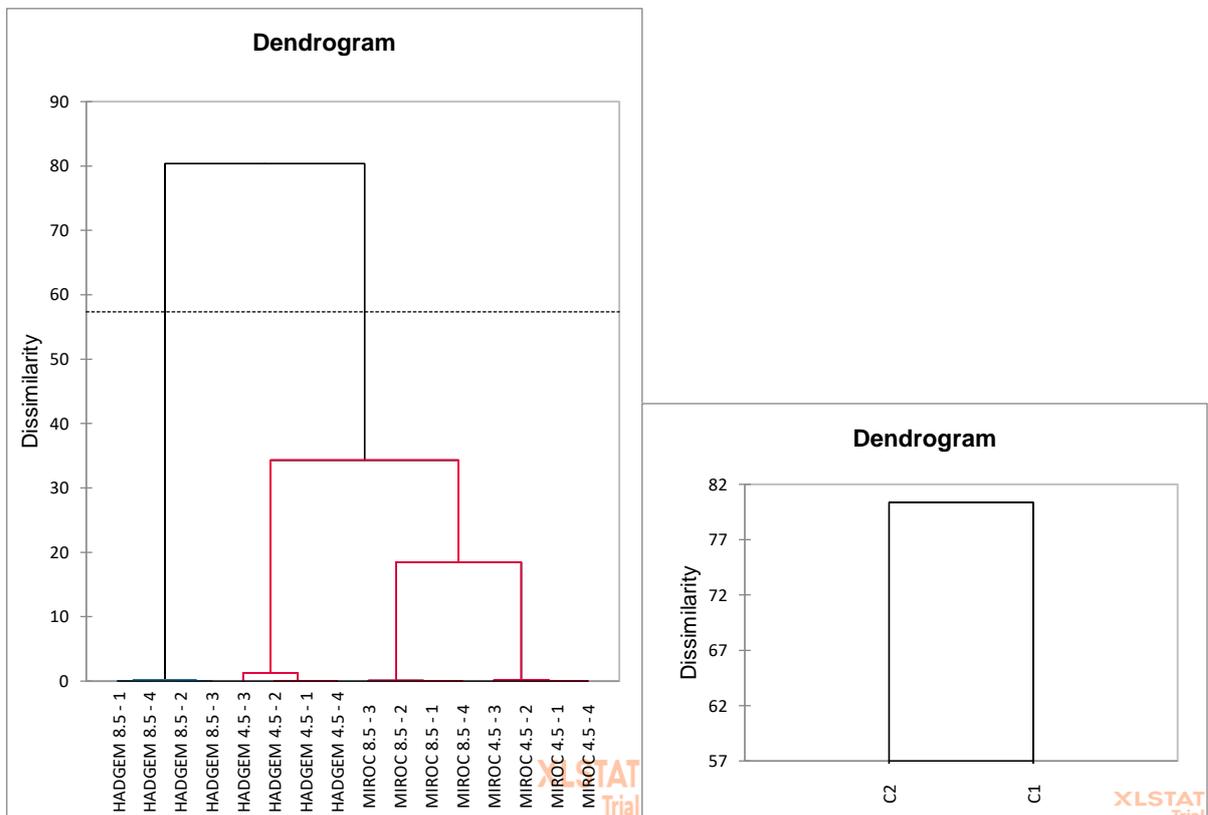
Fonte: Do Autor (2021).

Na matriz de correlação são indicadas em negrito as correlações mais significativas, sendo as mais próximas de 1 as correlações positivas mais fortes, e as mais próximas de -1, as correlações negativas mais fortes (Vieira 2008). Nota-se que houve maior correlação positiva entre as variáveis: SD e IS médio; CV do IS e eventos de IS  $< 0,2$ ; e maior período de IS  $> 0,2$  e SD. Também foi observada correlação positiva forte entre o maior período consecutivo de IS  $> 0,2$  e o IS médio, o que indica que quanto maior a média do IS, maior o período consecutivo em que a condição na bacia é sustentável.

Houve maior correlação negativa entre as variáveis: CV do IS e IS médio, e eventos de IS  $< 0,2$  e IS médio, o que indica que quanto menor o IS médio, maior o número de eventos insustentáveis, e vice-versa. Isso foi observado, visto que nos cenários com menor IS médio houve maior número de meses insustentáveis. Também foi observada correlação negativa forte entre o número de eventos com IS  $< 0,2$  e o maior período de IS  $> 0,2$ , o que indica que quanto maior o número de meses insustentáveis, menor será o período consecutivo com IS sustentável.

Na Figura 7 é apresentado o dendrograma com os grupos de cenários formados a partir da matriz de correlação.

Figura 7 – Dendrograma (à esquerda) e ampliação do dendrograma (à direita) representando a dissimilaridade entre os cenários avaliados.



Fonte: Do Autor (2021).

Pode-se observar que foram formados dois grupos maiores, sendo que um compreende os cenários do HadGEM 8.5, e o outro os demais cenários. Os cenários do HadGEM 8.5 foram os mais pessimistas, apresentando menor valor médio de IS, assim como maior número de eventos com  $IS < 0,2$ , diferindo assim dos demais cenários.

Ao analisar o outro grupo formado, as dissimilaridades foram muito pequenas, tanto que, na ampliação do dendrograma os cenários deste grupo são todos iguais. Os cenários do HadGEM 4.5 apresentaram uma pequena dissimilaridade dos demais cenários, visto que os cenários do HadGEM 4.5 apresentaram maior valor médio de IS, menor número de eventos insustentáveis, e também maior período consecutivo com eventos sustentáveis. Os cenários do MIROC 4.5 e do MIROC 8.5 ficaram muito próximos, visto que os resultados encontrados nestes cenários foram parecidos.

Na Tabela 4 têm-se os resultados obtidos no teste de tendência de Mann-Kendall para as séries simuladas de IS, considerando os diferentes cenários climáticos e de expansão da área irrigada.

Tabela 4 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para os cenários de expansão da área irrigada de 3,8% (a), 6% (b) e 8,5% ao ano (c), e sem expansão da área irrigada (d), nos diferentes cenários climáticos.

a)

| Series\Test | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------|---------------|--------------|-------------|
| HADGEM 4.5  | -0,012        | 0,795        | 0,000       |
| HADGEM 8.5  | -0,142        | <b>0,018</b> | 0,000       |
| MIROC 4.5   | -0,146        | <b>0,022</b> | 0,000       |
| MIROC 8.5   | -0,271        | <b>0,018</b> | 0,000       |

b)

| Series\Test | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------|---------------|--------------|-------------|
| HADGEM 4.5  | -0,028        | 0,575        | 0,000       |
| HADGEM 8.5  | -0,150        | <b>0,018</b> | 0,000       |
| MIROC 4.5   | -0,150        | <b>0,020</b> | 0,000       |
| MIROC 8.5   | -0,273        | <b>0,018</b> | 0,000       |

c)

| Series\Test | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------|---------------|--------------|-------------|
| HADGEM 4.5  | -0,079        | 0,180        | 0,000       |
| HADGEM 8.5  | -0,196        | <b>0,009</b> | 0,000       |
| MIROC 4.5   | -0,167        | <b>0,016</b> | 0,000       |
| MIROC 8.5   | -0,284        | <b>0,017</b> | 0,000       |

d)

| Series/Test       | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | -0,010        | 0,829        | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | -0,139        | <b>0,019</b> | 0,000       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | -0,145        | <b>0,022</b> | 0,000       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | -0,271        | <b>0,018</b> | 0,000       |

Fonte: Do Autor (2021).

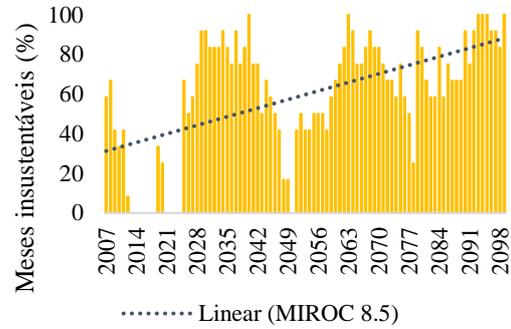
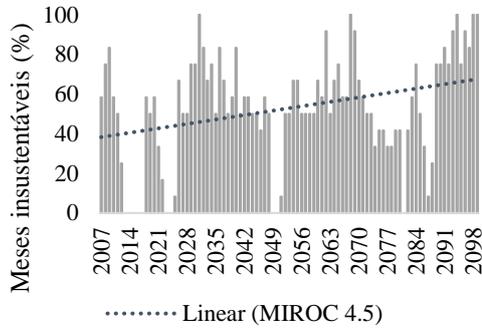
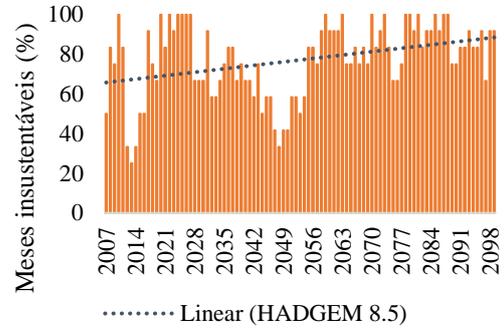
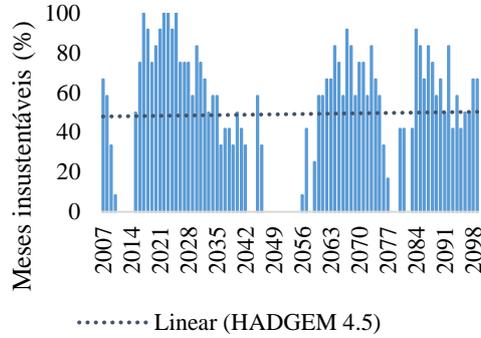
De acordo com os testes de tendência, em todos os cenários de expansão da área irrigada avaliados, apenas o cenário climático HadGEM 4.5 não apresentou tendência na série simulada de IS, visto que o valor-p foi maior que o nível de significância de 0,05, portanto a hipótese H0 não pôde ser rejeitada. Nos demais cenários o valor-p foi menor que o nível de significância, assim foi aceita a hipótese Ha, o que indica que há tendência na série. Assim, há tendência de redução do IS, ao longo do tempo, na maioria dos cenários climáticos avaliados.

O estimador de inclinação de Sen, utilizado para verificar a existência de autocorrelação na série, foi muito próximo de zero em todos os cenários, o que demonstra que a tendência é muito pequena.

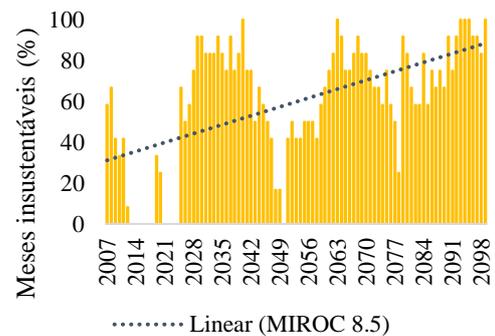
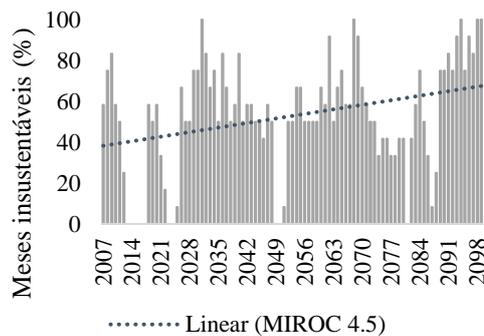
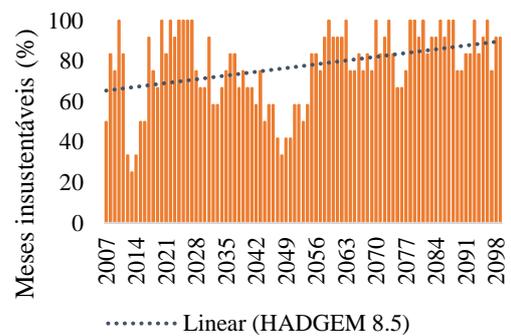
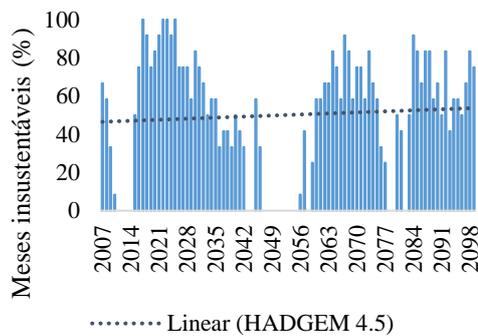
Foi calculada a porcentagem de meses em que o IS foi menor que 0,2, para todos os anos em todos os cenários. Na Figura 8 encontram-se as porcentagens de meses insustentáveis para cada cenário ao longo do tempo de simulação, considerando as diferentes taxas de crescimento da área irrigada.

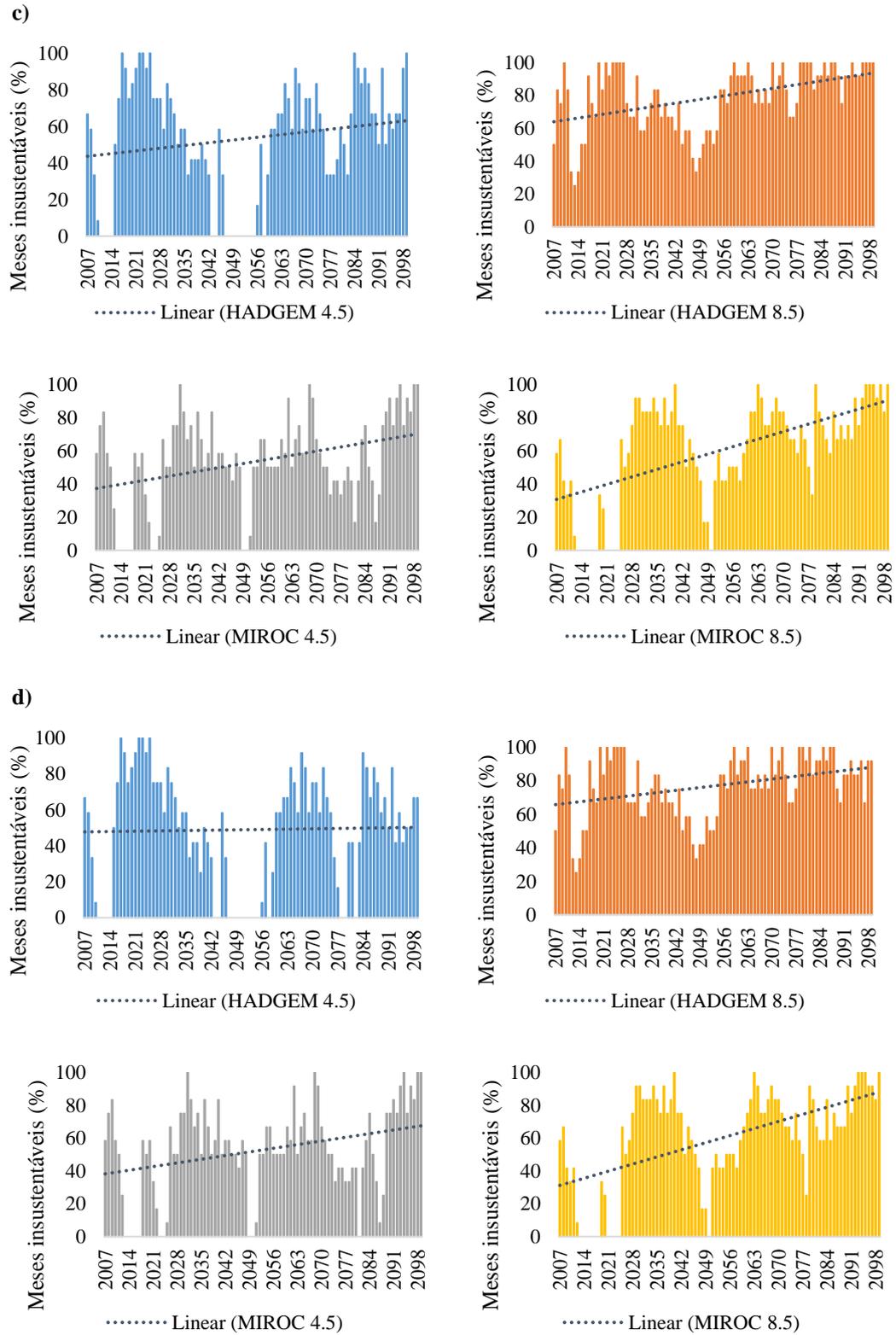
Figura 8 - Porcentagem de meses insustentáveis para os cenários de expansão da área irrigada de 3,8% (a), 6% (b) e 8,5% ao ano (c), e sem expansão da área irrigada (d), nos diferentes cenários climáticos.

a)



b)





Fonte: Do Autor (2021).

Observa-se que, apesar de o cenário HadGEM 8.5 ter sido mais insustentável, no que diz respeito ao IS médio e ao número de eventos com  $IS < 0,2$ , os cenários MIROC 4.5 e 8.5 apresentaram maior coeficiente angular da reta, no que diz respeito à porcentagem de meses

insustentáveis. Isso quer dizer que nesses cenários, houve um maior crescimento do número de meses com  $IS < 0,2$  até o final da simulação, o que pode ser atribuído ao fato de que houve uma maior redução na precipitação nesses cenários, o que foi observado por Rodrigues (2017).

Na Tabela 5 têm-se os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as séries de porcentagem de meses insustentáveis ao longo dos anos de simulação, para as diferentes taxas de crescimento da área irrigada.

Tabela 5 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para os cenários de expansão da área irrigada de 3,8% (a), 6% (b) e 8,5% ao ano (c), e sem expansão da área irrigada (d), nos diferentes cenários climáticos.

a)

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | -0,016        | 0,825             | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,230         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,215       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,171         | <b>0,000</b>      | 0,231       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,371         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,538       |

b)

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,018         | 0,815             | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,251         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,235       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,171         | <b>0,000</b>      | 0,231       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,375         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,556       |

c)

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,099         | 0,308             | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,322         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,298       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,191         | <b>0,000</b>      | 0,260       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,387         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,575       |

d)

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | -0,016        | 0,831             | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,225         | <b>0,000</b>      | 0,214       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,171         | <b>0,000</b>      | 0,231       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,371         | <b>&lt;0,0001</b> | 0,538       |

Fonte: Do Autor (2021).

De acordo com os testes de tendência, em todos os cenários de expansão da área irrigada avaliados, apenas o cenário climático HadGEM 4.5 não apresentou tendência na série simulada.

Nos demais cenários houve tendência de aumento na porcentagem de meses insustentáveis ao longo dos anos.

Quanto à existência de autocorrelação nas séries, o estimador de inclinação de Sen calculado foi positivo, o que indica que a tendência é de aumento e é maior no cenário MIROC 8.5.

Segundo Rodrigues (2017), que simulou por meio do modelo SWAT, os dados de escoamento utilizados no presente trabalho, as projeções dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os RCPs 4.5 e 8.5 na BHP, mostraram tendências de redução do escoamento, sendo que a redução mais severa poderá ocorrer no período de 2071-2099. No presente trabalho, foi observada tendência de redução do IS e aumento na porcentagem de meses insustentáveis, na maioria dos cenários avaliados, ao longo da simulação, o que pode ter sido causado pela redução do escoamento, assim como pelo aumento na demanda de água.

Ainda de acordo com Rodrigues (2017), o modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, foi o que apresentou maiores impactos hidrológicos projetados para a bacia de estudo, o que foi verificado no presente trabalho, visto que o Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5 foi o modelo que apresentou menor valor médio de IS e maior número de eventos com  $IS < 0,2$ , em todas as taxas de crescimento da área irrigada simuladas.

Souza et al. (2010), analisaram o comportamento hidrológico na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, fazendo o uso do software STELLA. Em cenário de mudança climática, que compreende futuros aumentos na precipitação e temperatura, no ano de 2039, o IS foi de 0,2, o que indica que já haveria um estresse hídrico no sistema. No presente trabalho, foi encontrado para a BHP, considerando a taxa de crescimento da área irrigada atual, de 3,8% ao ano, no ano de 2039, um IS médio de 0,43, 0,08, 0,27 e 0,16 para os cenários HadGEM 4.5 e 8.5, e MIROC 4.5 e 8.5, respectivamente. Isso indica que a situação dos recursos hídricos na bacia também já seria vulnerável neste ano para os cenários de emissão 8.5, que são os mais pessimistas.

Xu et al. (2002) simularam o Índice de Sustentabilidade, com o uso do STELLA, para uma sub-região da bacia de Yellow River, na China. Em um cenário de incremento na área irrigada de 20%, o IS foi de 0,29, 0,18 e 0,11, para os anos de 2010, 2020 e 2030, respectivamente, o que denota que a sub-região já apresenta escassez de água. Para a BHP, considerando a taxa de crescimento da área irrigada de 6% ao ano, foi encontrado, no ano de 2010 o IS médio de 0,52, 0,01, 0,35 e 0,45; em 2020, o IS de 0,11, 0, 0,43 e 0,54; e em 2030, o IS de 0,08, 0,18, 0,16 e 0,14, para os cenários HadGEM 4.5 e 8.5, e MIROC 4.5 e 8.5, respectivamente. Esses resultados apresentam que nos próximos anos a BHP também poderá

apresentar escassez de água se houver um incremento na área irrigada, nos cenários climáticos considerados.

Orellana González et al. (2008), em estudo no município de São Miguel do Anta (MG), avaliaram a sustentabilidade dos recursos hídricos com base no Índice de Sustentabilidade. Considerando um cenário integrado de mudança climática e incremento da área irrigada, onde 50% das terras agrícolas são irrigadas, nos anos de 2011, 2019, 2027 e 2035, o IS foi de, 0,34, 0,32, 0,30 e 0,27, respectivamente. Para a BHP, considerando a taxa de incremento da área irrigada de 8,5% ao ano, onde 50% das terras da bacia são irrigadas, foi encontrado, no ano de 2011, o IS de 0,53, 0,11, 0,48 e 0,48; em 2019, o IS de 0,11, 0,13, 0,41 e 0,51; em 2027, o IS de 0,16, 0,02, 0,37 e 0,3; e em 2035, o IS de 0,18, 0,09, 0,27 e 0,08, para os cenários HadGEM 4.5 e 8.5, e MIROC 4.5 e 8.5, respectivamente. Ambos os trabalhos demonstraram uma tendência de diminuição do IS ao longo dos anos, em cenário de mudança climática e aumento da área irrigada, o que pode levar ao comprometimento dos recursos hídricos nas bacias de estudo nos próximos anos.

## CONCLUSÃO

Com as simulações da oferta e demanda de água na bacia do rio Palma, considerando os diferentes cenários climáticos e de expansão da área irrigada, foi possível avaliar, a partir do Índice de Sustentabilidade, a situação dos recursos hídricos na bacia até o final do século.

No que diz respeito à oferta de água, esta apresenta uma redução ao longo da simulação. Já a demanda de água aumenta, principalmente nos cenários onde há uma expansão da área irrigada, e naqueles mais pessimistas no que diz respeito à emissão de gases de efeito estufa. Assim, ocorrem eventos em que a demanda sobrepõe a oferta, sobretudo no fim da simulação, o que faz com que o Índice de Sustentabilidade seja menor que 0,2, indicando insustentabilidade dos recursos hídricos na bacia.

Em todos os cenários de expansão da área irrigada, o cenário climático HadGEM 8.5, apresentou menor IS médio e maior número de eventos com IS menor que 0,2. Além disso, no dendrograma, o HadGEM 8.5 foi o que mais diferiu dos demais cenários, o que confirma que este é o cenário mais pessimista. À medida que cresce a área irrigada, nota-se uma redução na média do IS, e um aumento no número de eventos com IS menor 0,2, o que indica que a expansão da área irrigada também pode afetar os recursos hídricos da bacia. Apenas o cenário HadGEM 4.5 não apresentou tendência nas séries históricas, os demais apresentaram tendência de diminuição do IS ao longo do tempo.

Os cenários MIROC 4.5 e 8.5 apresentaram maior crescimento na porcentagem de meses insustentáveis ao longo do tempo, o que pode ser atribuído ao fato de que houve uma maior redução na precipitação nesses cenários. Com exceção do HadGEM 4.5, os cenários avaliados apresentaram tendência de aumento da porcentagem de meses insustentáveis ao longo da simulação, e também tendência de autocorrelação. Assim, dentre os cenários climáticos avaliados, o HadGEM 4.5 mostrou ser o mais otimista.

Os resultados encontrados mostram que poderão ocorrer problemas futuros na disponibilidade de água na bacia, e desta forma, podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos, no que diz respeito à alocação de água, tendo em vista o fornecimento de água aos usuários atuais e futuros e o atendimento às demandas ambientais, principalmente nos períodos de redução no escoamento. Assim, os resultados podem contribuir na tomada de decisão, para que o uso dos recursos hídricos na bacia possa continuar sem que isso afete seu ecossistema.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA. 2012 Notícias da ANA. <http://www.ana.gov.br/> (accessed 18 May 2020)
- Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos – ABIMAQ. 2018 *Estimativa da área irrigada no Brasil*. Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação – CSEI.
- Beskow S., Timm L. C., Tavares V. E. Q., Caldeira T. L. & Aquino L. S. 2016 Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, Southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 2567-2578.
- Caldeira T. L., Oliveira V. A., Steinmetz A. A., Viola M. R. & Beskow, S. 2018 Modelagem hidrológica determinística chuva-vazão em bacias hidrográficas: uma abordagem introdutória. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 5(1), 22-32.
- Fan C., Fan S. S., Wang C. & Tsai W. 2018 Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 167-175.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. 2018 Land & Water. AquaCrop. <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/Aquacrop/en/> (accessed 5 July 2020)
- Goes F. A. 2012 *Gestão de Reservatórios com Sistema de Apoio à Decisão Espacial: o Caso do Açude Castanhão*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2016 Pesquisa da pecuária municipal. <http://www.ibge.gov.br/> (accessed 12 June 2020)

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2016 Produção agrícola municipal. <http://www.ibge.gov.br/> (accessed 12 June 2020)

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2020 Projeções da população. <http://www.ibge.gov.br/> (accessed 18 May 2020)

Kendall M. 1975 *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Company, London.

Lopes A. V. & Freitas M. A. S. 2007 A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras. *REGA*, 4(1), 5-28.

Mann H. B. 1945 Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.

Maraun D., Shepherd T. G., Widmann M., Zappa, G. Walton, D., Gutiérrez J. M., Hagemann S., Richter I., Soares P. M. M., Hall A. & Mearns L. O. 2017 Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, 7(11), 764–773.

Matos A. T. 2003 *Manejo e tratamento de resíduos agroindustriais I*. Viçosa: UFV.

Orellana González A. M. G., Silva Jr. A. G., Sánchez-Román R. M., Silva E., & Braga J. L. 2008 Water resources sustainability at São Miguel do Anta county, Minas Gerais, Brazil: a system dynamics approach. *BioEng*, 2(3), 231-241.

Ortega M. P. & Ortega A. P. 2017 *Evaluación de la relación oferta demanda hídrica de las principales fuentes abastecedoras de agua del municipio de ocaña norte de Santander, mediante simulación dinámica de escenarios prospectivos*. Monografía, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, Colombia.

Rodrigues J. A. M. 2017 *Impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do rio Tocantins*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Sen P. K. 1968 Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Souza M. N., Mantovani E. C., Orellana Gonzalez A. M. G., Sánchez-Román R. M. & Silva M. A. A. S. 2010 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*, 1(1), 16-42.

Steduto P. 2009 Aquacrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101 (3), 426-437.

Steduto P. 2012 *Crop yield response to water*. Rome: FAO.

Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation - STELLA. 2001 *Introduction to systems thinking*. NH: High Performance Systems.

Tan M. L., Gassma, P. W., Yang X. & Haywood, J. 2020 A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 143, 103662.

Vieira S. 2011 *Introdução à Bioestatística*. Rio de Janeiro: Elsevier.

Ward J. H. 1963 Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, 238-244.

XLSTAT. Xlstat add-in for Excel. 2020 New York. <http://www.xlstat.com/> (access 25 August 2021)

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*, 16(3), 239-261.

Yue S. & Wang C.Y. 2004 The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour. Manag.*, 18, 201-218.

## Artigo 2 – Versão preliminar

# IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A DEMANDA POR ÁGUA PARA A IRRIGAÇÃO DE CULTURAS AGRÍCOLAS NA BACIA DO RIO PALMA (TO)

## RESUMO

O aumento na demanda por água para a irrigação pode afetar a disponibilidade dos recursos hídricos. Mudanças no comportamento climático nos próximos anos podem alterar a demanda pela irrigação de culturas e, modelos como o AquaCrop, podem prever essas alterações. O objetivo deste trabalho foi simular os impactos de mudanças climáticas na demanda por água para a irrigação de culturas agrícolas na bacia do rio Palma, TO, ao longo do século. No AquaCrop, os dados de entrada foram os de evapotranspiração potencial, provenientes de simulações feitas por meio do modelo SWAT com base nas projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES, para os RCPs 4.5 e 8.5. Para a simulação do balanço hídrico, foram escolhidos os tipos de solo arenoso, argiloso e médio, e consideradas as culturas mais expressivas na bacia e que mais utilizam de irrigação, sendo elas: cana-de-açúcar, feijão, milho, sorgo e soja. O cenário HadGEM 8.5 apresentou maiores valores médios de demanda de irrigação. Todos os cenários avaliados apresentaram uma tendência de crescimento na demanda de irrigação anual ao longo do século. Assim, as mudanças climáticas e o conseqüente aumento na demanda por água para a irrigação, podem contribuir para problemas futuros na disponibilidade de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** AquaCrop; gestão de recursos hídricos; modelagem hidrológica; modelos de cultura; SWAT.

## INTRODUÇÃO

Com a expansão da agricultura irrigada no Brasil, pode haver um aumento na demanda por água para a irrigação das culturas agrícolas, que aliada a outras demandas, pode afetar a disponibilidade dos recursos hídricos. Assim, é necessário que sejam tomadas medidas no que diz respeito à eficiência de métodos de irrigação e manejo das culturas, além de buscar formas de aumentar a oferta de água, em situações onde a demanda é maior do que a disponibilidade de água.

Os mecanismos de alocação de água, como os limites de utilização de corpos hídricos e a cobrança pelo uso da água, podem ser utilizados como ferramentas de gestão dos recursos hídricos, tendo em vista atender a demanda dos usuários e também as demandas ambientais (Lopes & Freitas 2007). Para a aplicação eficaz destes mecanismos, torna-se necessário o uso

de ferramentas que permitam a simulação de cenários futuros, levando em conta os fatores que podem interferir nos recursos hídricos, como a demanda de irrigação das culturas.

Os modelos matemáticos são os mais utilizados para a simulação agrícola, dentre eles, existem os modelos de crescimento de culturas, que tem como objetivo simular variações de produtividade, por meio de alterações ocorridas ao longo dos cultivos agrícolas (Oliveira 2018). O AquaCrop (Steduto 2009, 2012) é um modelo de cultura, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), que utiliza a água como fator determinante para a simulação da produtividade da cultura (Hsiao et al. 2009).

Tendo em vista as projeções de mudanças no comportamento climático nos próximos anos, é provável que estas alterem a produção agrícola e os recursos hídricos, sendo que, o aquecimento leva a um aumento da evaporação e com a retirada de água armazenada do solo há uma diminuição na disponibilidade hídrica, gerando assim um maior déficit hídrico (Campos 2010).

A temperatura influencia diretamente no metabolismo básico das plantas, e conseqüentemente afeta a evolução de uma cultura no campo (Bergamaschi & Matzenauer 2009). Por sua vez, o déficit hídrico pode reduzir a área foliar, diminuindo a fotossíntese e interferindo em vários outros processos do desenvolvimento das plantas (Minuzzi & Lopes 2015).

Ao utilizar modelos de cultura associados com modelos hidrológicos, que podem levar em consideração diferentes cenários climáticos, é possível simular como as mudanças climáticas podem afetar a demanda hídrica das culturas. Um exemplo de modelo hidrológico é o SWAT, que além de dados futuros de vazão, também fornece dados de evapotranspiração potencial, que podem ser utilizados como dados de entrada referentes ao clima no AquaCrop.

Assim, o objetivo deste trabalho foi simular, por meio do AquaCrop, os impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação de culturas agrícolas de contribuição expressiva na bacia do rio Palma (TO), utilizando dados futuros de evapotranspiração potencial gerados pelo SWAT para diferentes cenários climáticos.

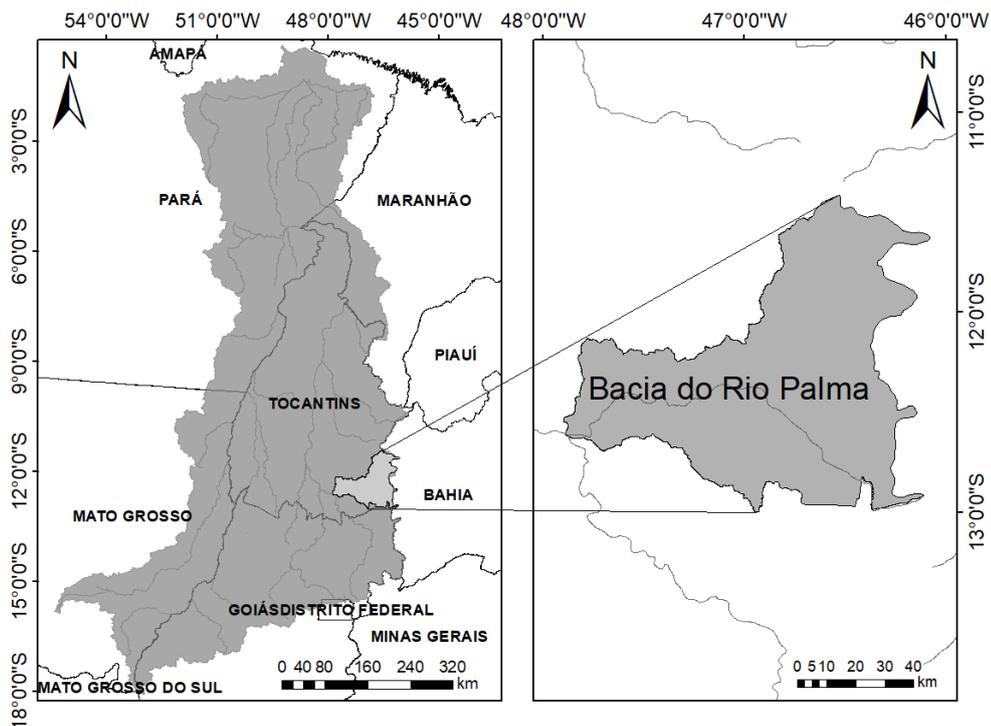
## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

A área de estudo corresponde à bacia do rio Palma (BHP), que está localizada na região Sudeste do estado do Tocantins, e pertence ao Sistema Hidrográfico do rio Tocantins (margem

direita). A região hidrográfica do rio Palma está localizada entre os paralelos Sul 13° 03' e 11° 24' e os meridianos de longitude Oeste 47° 53' e 46° 04' (Figura 1).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (à esquerda) e bacia hidrográfica do rio Palma (à direita).



Fonte: Do Autor (2021).

A bacia do rio Palma apresenta uma área de drenagem de 17.468 km<sup>2</sup>, e para sua delimitação tomou-se como seção de controle o posto fluviométrico de Barra do Palma, que fica localizado no Rio Palma, município de Paranã, TO (Rodrigues 2017).

### Fonte de dados

Os dados futuros de evapotranspiração potencial utilizados neste trabalho foram simulados por meio do modelo SWAT, por Rodrigues (2017), que avaliou em seu trabalho os impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do rio Tocantins, incluindo a bacia do rio Palma.

No trabalho de Rodrigues (2017), foram estimados os impactos das mudanças climáticas sobre o escoamento na BHP, a partir de simulações hidrológicas baseadas nas projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES. Essas projeções

foram produzidas para o clima presente (1961-2005) e para os RCPs 4.5 e 8.5, ao longo do século XXI (2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099) com resolução de 20 km.

### **Modelo AquaCrop**

Para a simulação da demanda de água para a irrigação das diferentes culturas, foi utilizada a versão 6.1 do software AquaCrop, desenvolvido pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (Steduto 2009, 2012).

Para os dados de entrada referentes às culturas, como características de crescimento da parte aérea e radicular, resposta ao estresse hídrico e outros fatores abióticos, foram utilizados os valores pré-estabelecidos no software para cada cultura considerada, uma vez que estes representam valores médios já estudados para cada cultura em questão. Os valores de cada parâmetro utilizado podem ser encontrados no relatório FAO número 66 (Steduto 2012), referente ao funcionamento do AquaCrop.

O software apresenta diferentes possibilidades para os dados de entrada referentes ao clima, uma delas é a entrada de variáveis climáticas como: temperatura, umidade relativa, vento e outros, e então, o software calcula a evapotranspiração de referência. Outra possibilidade, que foi a utilizada no presente trabalho, é a entrada direta com os valores da evapotranspiração de referência, que é usada para calcular a evapotranspiração da cultura, por meio da sua multiplicação pelo coeficiente de cultura ( $k_c$ ). Desta forma, os dados de entrada de evapotranspiração foram os provenientes das simulações feitas com o auxílio do modelo SWAT, com base em projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES para os cenários de emissão 4.5 e 8.5.

Os dados de saída obtidos foram somente aqueles referentes à necessidade de irrigação das culturas, que são calculados pelo software por meio de um balanço hídrico no solo em escala diária.

Para a simulação do balanço hídrico pelo AquaCrop é necessário a informação do tipo de solo. Primeiramente, foi utilizado um tipo de solo padrão apresentado pelo software, que consiste em um solo de textura média, com grande profundidade e sem entrada de água proveniente do lençol freático. Também foram feitas simulações utilizando os tipos de solo arenoso e argiloso.

Optou-se por simular o balanço hídrico no AquaCrop utilizando-se de um esquema de irrigação, no qual era permitido uma depleção no armazenamento de água pelo solo de 30%, e

quando atingido este ponto era feita uma irrigação para se voltar à condição de umidade na capacidade de campo.

Foram analisadas as culturas mais expressivas na bacia de acordo com o último censo do IBGE, e consideradas as que mais utilizam de irrigação, sendo elas: cana-de-açúcar, feijão, milho, sorgo e soja. Foram utilizadas séries históricas provenientes da plataforma Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, a fim de avaliar a proporção de cada cultura considerada nos municípios da bacia ao longo dos anos. Diante da dificuldade de alocação das culturas dentro da área de estudo, optou-se por desconsiderar o efeito que esta alocação teria nos resultados, distribuindo-as aleatoriamente dentro da bacia hidrográfica.

Optou-se pela separação das culturas entre culturas anuais e culturas perenes, sendo a cana-de-açúcar a única representante das culturas perenes. A utilização da cana-de-açúcar separadamente se deu pela importância que a cultura tem ganhado na região, e pelo comportamento diferencial desta quanto à demanda de água para a irrigação.

Como a simulação é realizada em escala diária, foi necessário informar, como variável de entrada ao modelo, a data de plantio de cada cultura. Para a cana, que é uma cultura perene, a irrigação é necessária durante o ano todo, de acordo com as variações no seu desenvolvimento e clima. Para as culturas anuais foi considerado o plantio em uma data fixa para cada cultura e, para a escolha desta, foi utilizado o calendário de plantio para o estado do Tocantins, apresentado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB 2019). Para as culturas do milho e do feijão, foram utilizados os dois plantios que podem ocorrer, na primeira e segunda safra.

Foi então calculada a demanda líquida para a irrigação, para cada cultura, em cada ciclo de produção. Essa demanda representa a quantidade de água necessária para irrigar a cultura sem considerar a eficiência do método de irrigação utilizado.

### **Calibração e validação**

Na fase de calibração do modelo AquaCrop são ajustados alguns parâmetros de forma a obter a melhor aproximação entre os dados simulados e os dados observados, o que é feito a partir de análises estatísticas.

De acordo com Alencar (2014), que fez em seu trabalho a parametrização e validação do AquaCrop para a cana-de-açúcar, a forma mais utilizada para a parametrização é, primeiramente, executar simulações com dados obtidos na literatura ou de culturas similares, e em seguida, comparar os resultados simulados com dados experimentais. Então, deve-se ajustar

os parâmetros, executar a simulação e comparar, e repetir esse procedimento até serem obtidos os melhores resultados para os índices estatísticos.

No estudo de Alencar (2014), os parâmetros iniciais foram derivados de dados de literatura e de culturas similares à cana-de-açúcar, como o milho, que já haviam sido parametrizadas. Os principais parâmetros do modelo podem ser aplicados para a maioria das culturas, sendo estes conservativos, como aqueles relacionados aos limites de temperatura do ar para o crescimento, transpiração da cultura, crescimento do dossel, estresse hídrico e produção da biomassa. Outros parâmetros são específicos de cada cultura e do seu manejo (Alencar 2014).

No estudo de Silva (2019), onde foi avaliado o consumo hídrico do feijão caupi cultivado no semiárido do Nordeste, a calibração e validação do modelo foi feita a partir da comparação dos valores observados e simulados para as variáveis biomassa total e produtividade. O desempenho do modelo foi então avaliado por meio de diferentes parâmetros estatísticos, que apresentaram bons resultados, o que demonstra a capacidade do modelo de estimar satisfatoriamente a produtividade em situações de déficit hídrico.

Castillo (2016) analisou os efeitos das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento da soja. O modelo AquaCrop foi calibrado para simular o rendimento de grãos de soja na bacia do rio Potiribu (RS). Tendo em vista avaliar a qualidade da calibração, os rendimentos simulados foram comparados com rendimentos históricos do mesmo período, disponibilizados pelo IBGE. Os resultados obtidos na calibração do modelo foram satisfatórios.

Silva (2018) avaliou os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja na região de Matopiba, que corresponde aos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Nesse estudo, o modelo AquaCrop foi calibrado para prever a produtividade de grãos de soja sob diferentes níveis de irrigação usando os dados de duas campanhas experimentais. Os dados de entrada para a calibração foram parâmetros de clima, solo, cultura, manejo de campo e irrigação. O desempenho do modelo obtido na calibração e validação foi avaliado por meio de diferentes indicadores estatísticos, comparando os valores simulados e observados nos experimentos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, o que demonstra a robustez e a aplicabilidade geral do modelo (Silva 2018).

## **Teste de Mann-Kendall**

Para verificar a existência de tendência nas séries de IS simuladas, foi utilizado o Teste de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975), que é um teste não paramétrico de tendência em série temporal. A hipótese nula  $H_0$  para este teste é de que não há tendência na série. Os testes de baseiam no cálculo do coeficiente de correlação tau de Kendall, que pode ser interpretado como a diferença entre as probabilidades de que as variáveis variem na mesma direção e as probabilidades de que as variáveis variem na direção oposta (XLSTAT 2020).

Foi considerado um nível de significância de 5%, assim a hipótese de ausência de tendência foi rejeitada quando o valor-p foi inferior ao nível de significância.

O teste de Mann-Kendall exige que as observações sejam independentes, ou seja, a autocorrelação não deve ser significativa, pois a variância da estatística S pode ser subestimada (XLSTAT 2020). Para verificar a existência de autocorrelação nas séries, foi escolhido o teste de Yue e Wang (2004), que tem um melhor desempenho quando há uma tendência e uma autocorrelação. Neste método é calculado o estimador de inclinação de Sen (Sen 1968), quanto mais próximo este for de 0, menor é a tendência, e o sinal indica se a tendência está aumentando ou diminuindo.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Validação do modelo**

Como não foram simulados dados de produtividade das culturas e nem realizadas campanhas experimentais, sendo somente utilizados os dados de necessidade de irrigação das culturas gerados por meio do AquaCrop, não foi possível realizar a calibração do modelo.

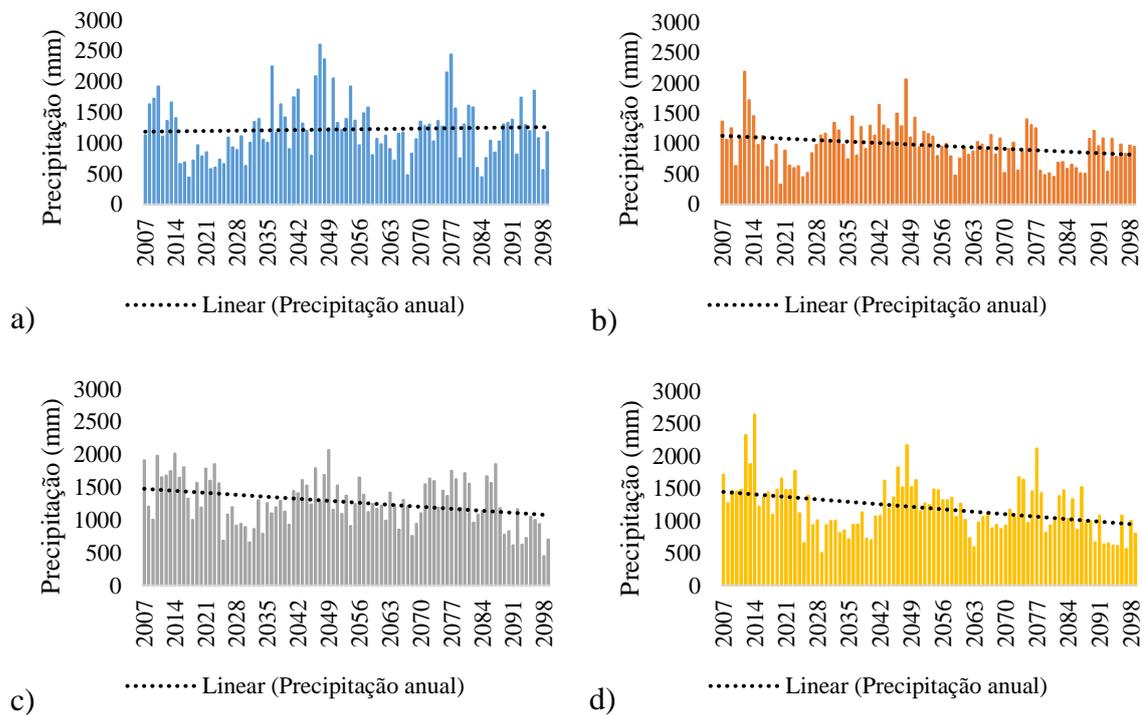
Foram buscados na literatura trabalhos que também avaliaram a demanda de irrigação das mesmas culturas consideradas neste estudo e, que além disso, simularam também a produtividade e realizaram a calibração e validação do modelo AquaCrop, comparando com dados experimentais.

Observou-se que o AquaCrop apresenta um bom desempenho para simular a produtividade e demanda de irrigação das culturas, quando comparado com dados experimentais por meio de análises estatísticas, podendo assim ser utilizado para simular a necessidade de irrigação das culturas analisadas neste estudo.

## Simulação

O comportamento da precipitação ao longo dos anos de simulação para os diferentes cenários climáticos, obtida a partir do SWAT por Rodrigues (2017), está apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Precipitação anual nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d).



Fonte: Do Autor (2021).

Na Tabela 1 são apresentados os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as séries de precipitação referentes a cada cenário climático.

Tabela 1 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a precipitação anual nos cenários HadGEM 4.5, HadGEM 8.5, MIROC 4.5, MIROC 8.5.

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,051         | 0,303             | 1,486       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | -0,177        | <b>0,000</b>      | -3,147      |
| <b>MIROC 4.5</b>  | -0,212        | <b>&lt;0.0001</b> | -4,332      |
| <b>MIROC 8.5</b>  | -0,254        | <b>&lt;0.0001</b> | -5,351      |

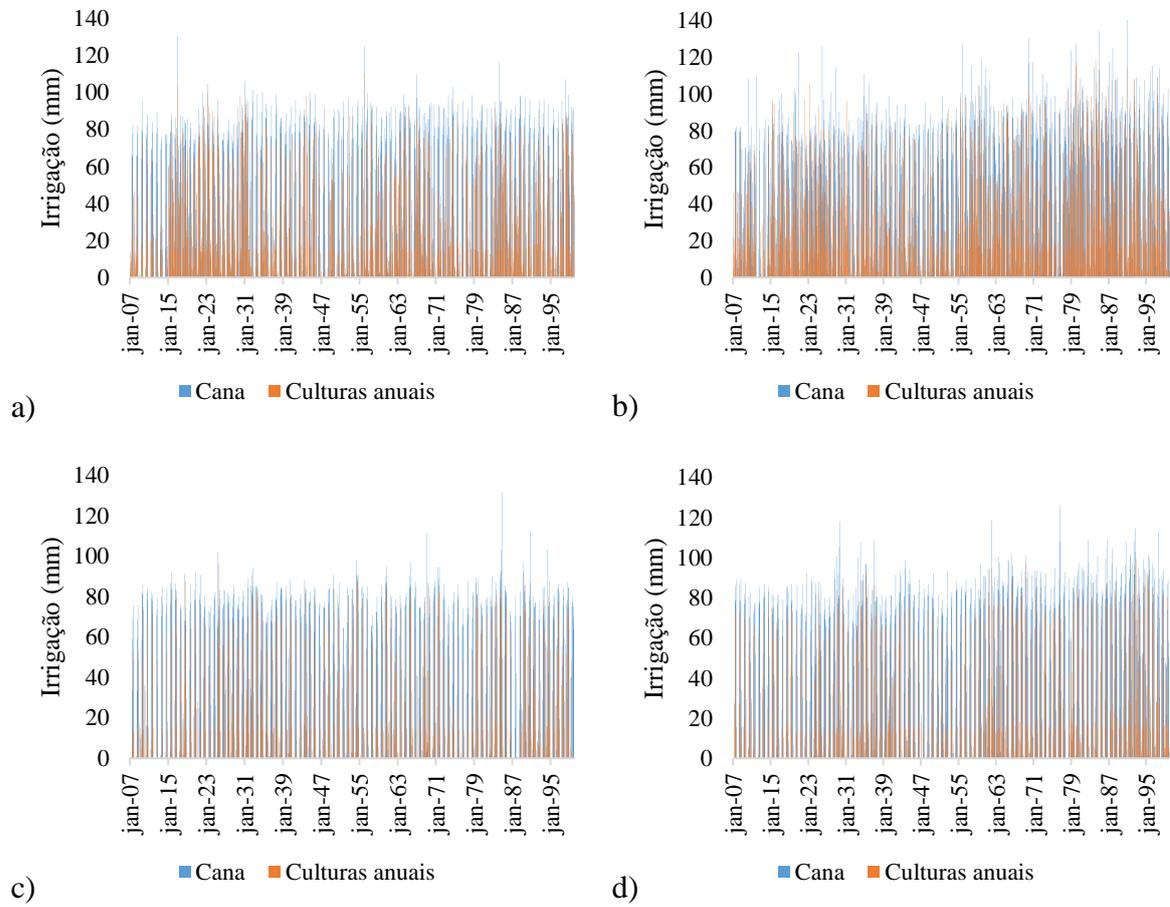
Fonte: Do Autor (2021).

Somente no cenário HadGEM 4.5 não foi observada tendência na série de precipitação, nos demais cenários houve tendência de redução da precipitação ao longo da simulação. Pode-se observar que nos cenários MIROC 4.5 e 8.5, a tendência é ainda maior, pois o valor-p é muito próximo de zero. Os gráficos da Figura 4 também mostram que o coeficiente angular da reta de tendência nos cenários MIROC 4.5 e 8.5 é maior, indicando maior redução da precipitação ao longo do tempo.

Para a verificação da existência de autocorrelação, o estimador de inclinação de Sen calculado apresentou valor negativo, o que indica que a tendência está diminuindo, e é maior nos cenários MIROC 4.5 e 8.5.

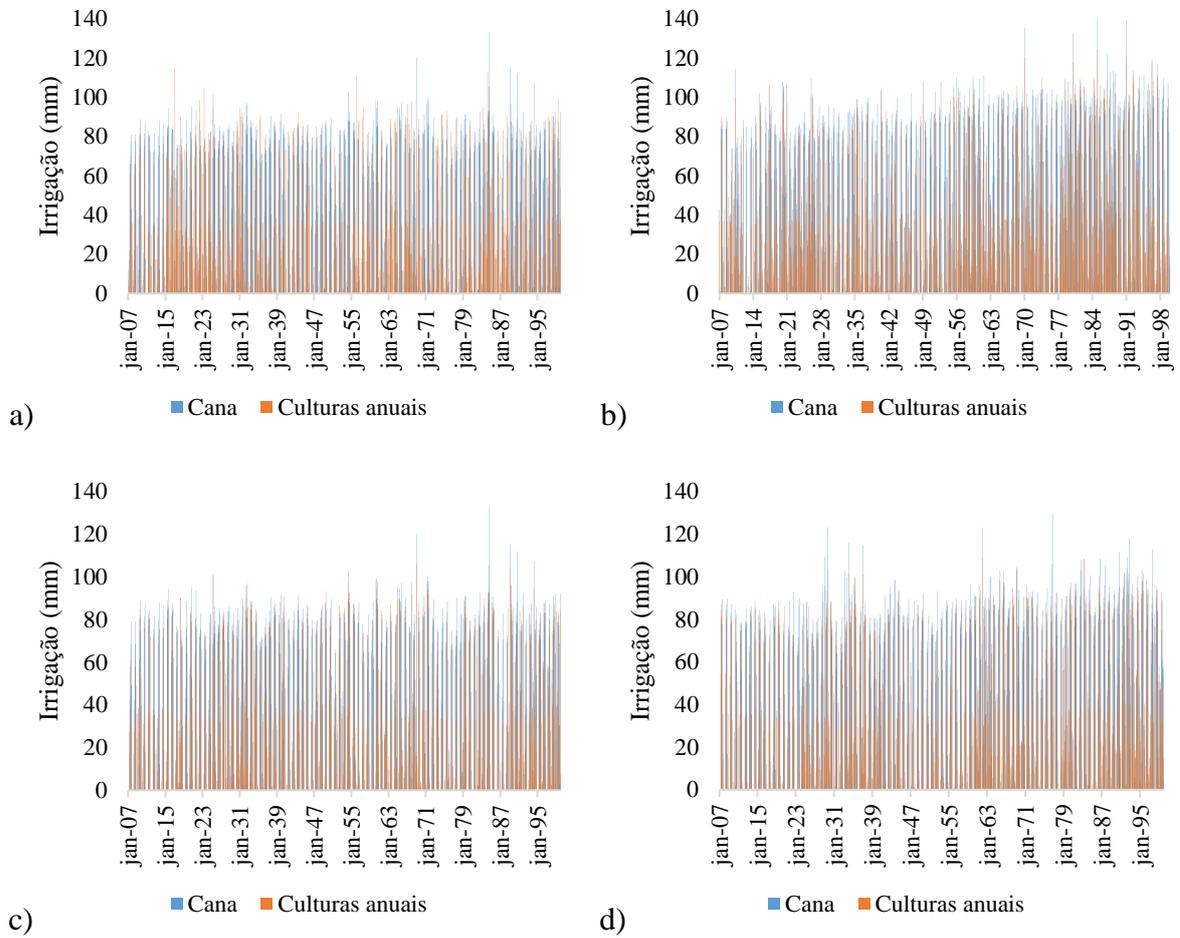
Foram feitas simulações de necessidade de irrigação das culturas no AquaCrop, para os tipos de solo médio, arenoso e argiloso, a fim de avaliar a influência destes na demanda de irrigação das culturas. Têm-se nas Figuras 3, 4 e 5, os resultados mensais obtidos para as culturas anuais e a cana-de-açúcar, nos diferentes cenários e modelos climáticos, para os tipos de solo médio, arenoso e argiloso, respectivamente.

Figura 3 – Demanda de irrigação mensal das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo médio.



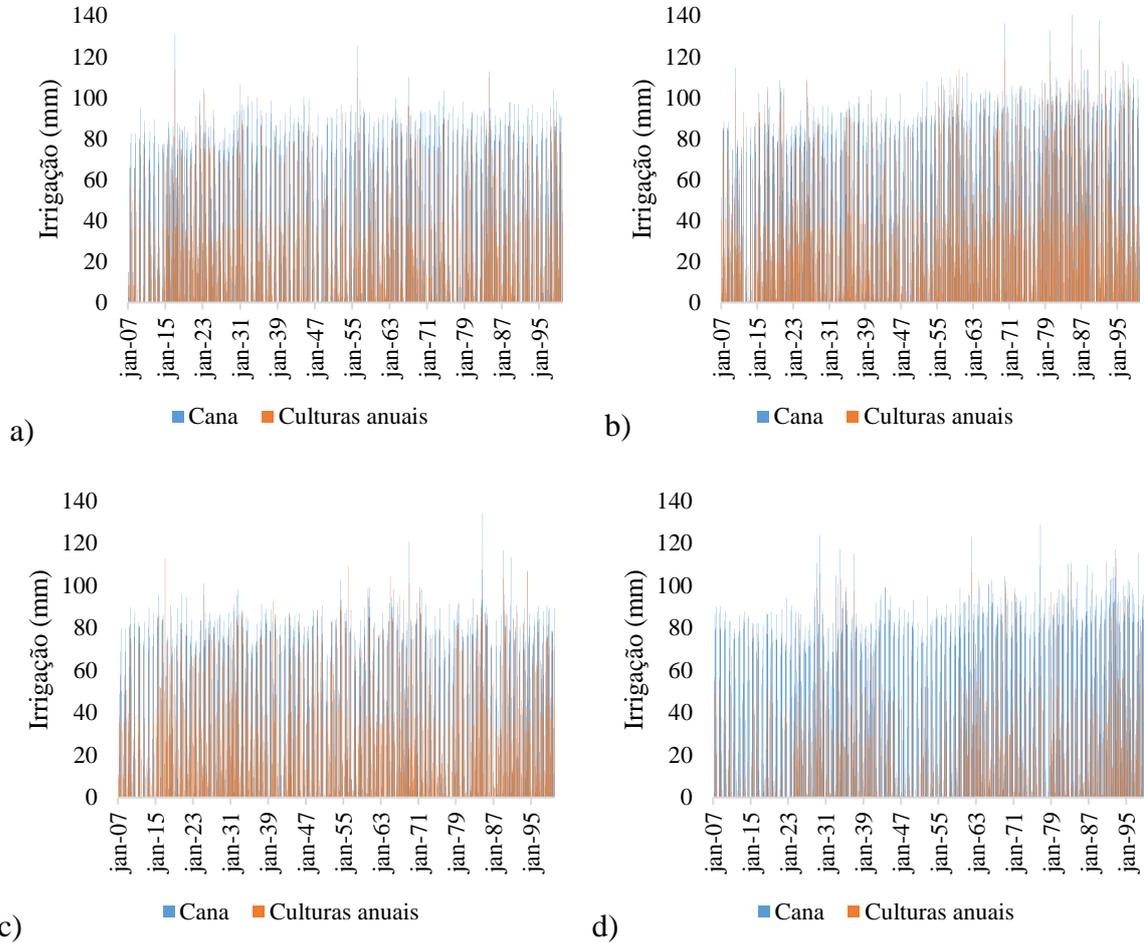
Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4 – Demanda de irrigação mensal das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo arenoso.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 5 – Demanda de irrigação mensal das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo argiloso.



Fonte: Do Autor (2021).

Para o tipo de solo médio, o cenário HadGEM 8.5, foi o que apresentou maior valor médio na demanda de irrigação. O cenário 8.5 é pessimista em relação à emissão de gases de efeito estufa, onde pode haver um maior aumento na temperatura e conseqüentemente uma redução na quantidade de água disponível para as plantas, que irão necessitar de mais água proveniente de irrigação. Em seguida aparece o HadGEM 4.5, o MIROC 8.5 e o MIROC 4.5. Apesar de terem sido simulados valores menores de demanda de irrigação considerando os cenários MIROC 4.5 e 8.5, estes cenários foram os que simularam uma maior redução na precipitação ao longo do tempo.

Considerando o tipo de solo arenoso, os cenários que apresentaram maiores valores médios de demanda de irrigação foram os que consideram o cenário de emissão mais

pessimista, HadGEM 8.5 e MIROC 8.5. O HadGEM 4.5 e o MIROC 4.5, que consideram o cenário de emissão mais otimista, apresentaram menores valores de demanda de irrigação.

Para o solo argiloso, o cenário HadGEM 8.5, assim como nos outros tipos de solo, foi o que apresentou maiores valores na demanda de irrigação. Em seguida têm-se o HadGEM 4.5, o MIROC 4.5 e o MIROC 8.5, o que demonstra que o modelo Eta/HADGEM2-ES pode projetar impactos maiores aos recursos hídricos na bacia.

Em todos os tipos de solo e cenários climáticos a cana-de-açúcar obteve maior valor de demanda de irrigação que as culturas anuais, atingindo, em média, mais de 60% da demanda total de irrigação mensal ao longo do tempo. Isso ocorre devido ao fato de que a cana é uma cultura perene, onde a irrigação é necessária durante grande parte do ano. No cenário MIROC 8.5, referente ao solo argiloso, a demanda de irrigação da cana foi ainda maior, atingindo, em média, mais de 70% da demanda total mensal.

Nas Tabelas 2, 3 e 4 encontram-se os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda de irrigação mensal das culturas nos diferentes cenários climáticos, para os tipos de solo considerados.

Tabela 2 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda mensal de irrigação no solo médio.

|                   | Series\Test     | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,038         | <b>0,011</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,037         | 0,054        | 0,000       |
|                   | Total           | 0,037         | <b>0,045</b> | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,146         | <b>0,014</b> | 0,001       |
|                   | Culturas anuais | 0,095         | 0,052        | 0,000       |
|                   | Total           | 0,152         | <b>0,024</b> | 0,001       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,039         | <b>0,020</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,033         | <b>0,036</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,045         | <b>0,015</b> | 0,000       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,113         | <b>0,004</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,108         | <b>0,005</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,110         | <b>0,013</b> | 0,000       |

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 3 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda mensal de irrigação no solo arenoso.

|                   | Series\Test     | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,040         | <b>0,019</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,025         | <b>0,026</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,041         | <b>0,009</b> | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,135         | <b>0,009</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,081         | 0,062        | 0,000       |
|                   | Total           | 0,117         | <b>0,030</b> | 0,001       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,046         | <b>0,011</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,048         | <b>0,004</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,048         | <b>0,011</b> | 0,000       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,119         | <b>0,002</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,093         | <b>0,006</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,103         | <b>0,010</b> | 0,000       |

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 4 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda mensal de irrigação no solo argiloso.

|                   | Series\Test     | Kendall's tau | p-value      | Sen's slope |
|-------------------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,039         | <b>0,009</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,033         | <b>0,032</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,037         | <b>0,029</b> | 0,000       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | Cana-de-açúcar  | 0,150         | <b>0,011</b> | 0,001       |
|                   | Culturas anuais | 0,100         | 0,052        | 0,000       |
|                   | Total           | 0,139         | <b>0,027</b> | 0,001       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,054         | <b>0,007</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,046         | <b>0,012</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,054         | <b>0,014</b> | 0,000       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | Cana-de-açúcar  | 0,135         | <b>0,003</b> | 0,000       |
|                   | Culturas anuais | 0,114         | <b>0,031</b> | 0,000       |
|                   | Total           | 0,154         | <b>0,007</b> | 0,001       |

Fonte: Do Autor (2021).

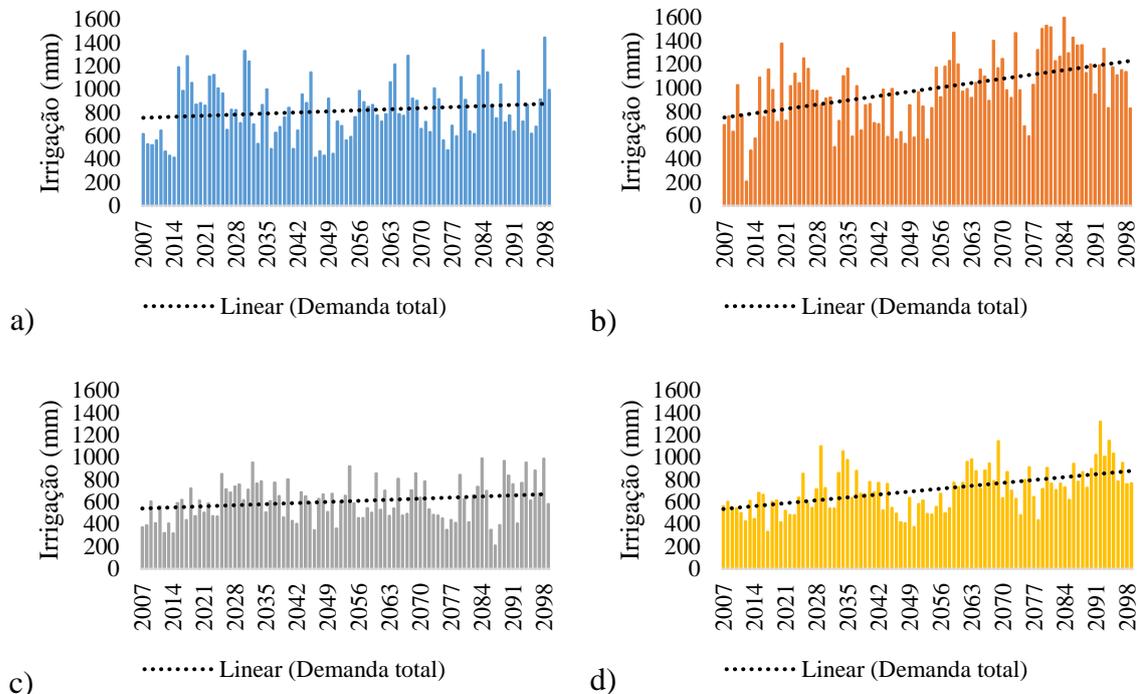
Considerando o solo médio, somente não houve tendência nas séries simuladas para as culturas anuais nos cenários HadGEM 4.5 e 8.5, visto que o valor-p foi maior que o nível de significância de 0,05, portanto a hipótese  $H_0$  não pôde ser rejeitada. Nas demais séries simuladas, o valor-p foi menor que o nível de significância, sendo aceita a hipótese  $H_a$ , assim, há tendência de aumento na demanda de irrigação ao longo do tempo.

Ao considerar os solos arenoso e argiloso, somente não houve tendência nas séries simuladas para as culturas anuais no cenário climático HadGEM 8.5, nas demais séries foi observada tendência de aumento na demanda de irrigação.

O estimador de inclinação de Sen, utilizado para verificar a existência de autocorrelação na série, foi muito próximo de zero em todos os cenários, o que demonstra que a tendência é muito pequena.

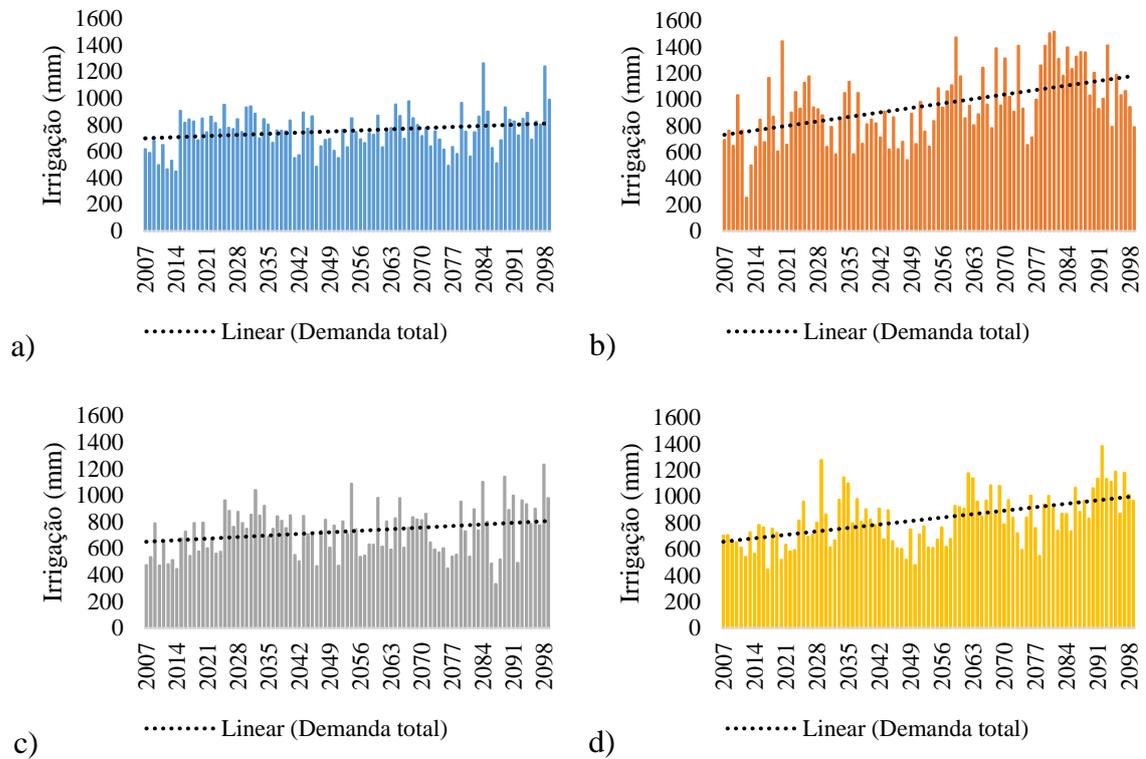
Têm-se nas Figuras 6, 7 e 8 a demanda de irrigação anual total das culturas, considerando os tipos de solo médio, arenoso e argiloso.

Figura 6 – Demanda de irrigação anual das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo médio.



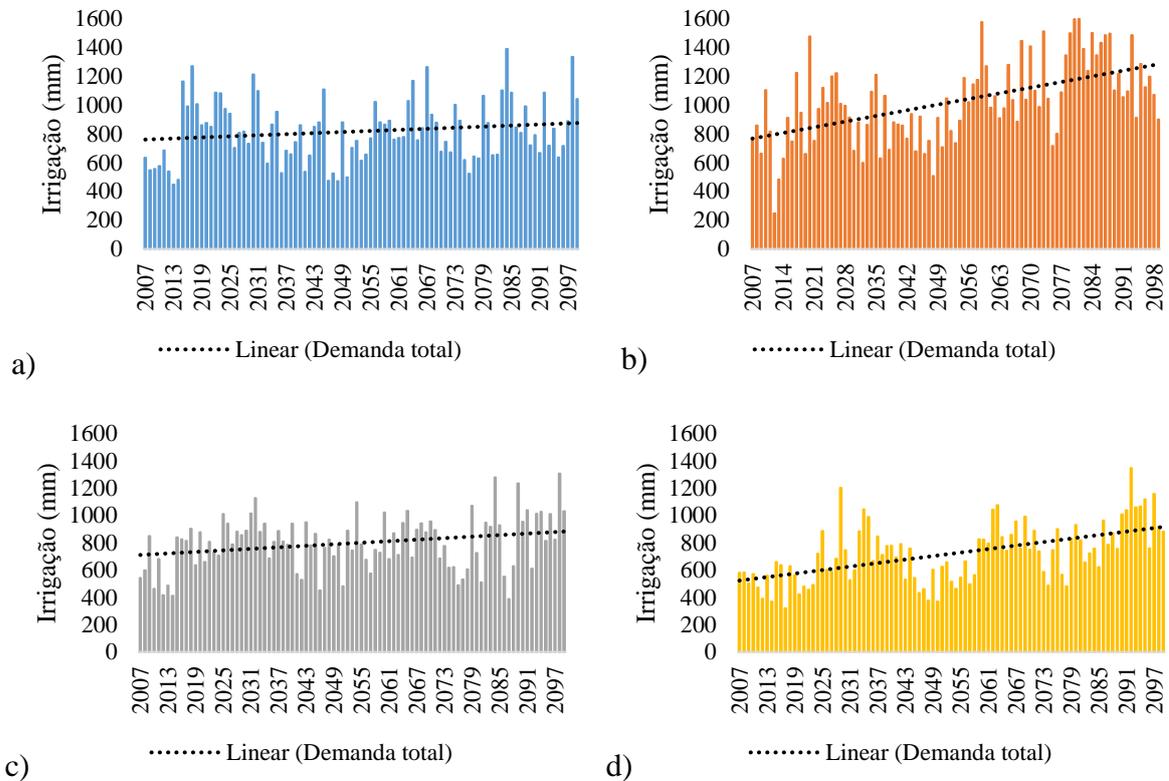
Fonte: Do Autor (2021).

Figura 7 – Demanda de irrigação anual das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo arenoso.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 8 – Demanda de irrigação anual das culturas nos cenários HadGEM 4.5 (a), HadGEM 8.5 (b), MIROC 4.5 (c), MIROC 8.5 (d) para o solo argiloso.



Fonte: Do Autor (2021).

São apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, os resultados encontrados no teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda anual de irrigação nos diferentes cenários climáticos, para os tipos de solo considerados.

Tabela 5 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda anual de irrigação no solo médio.

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,091         | <b>0,009</b>      | 1,259       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,314         | <b>&lt;0,0001</b> | 5,075       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,126         | <b>0,001</b>      | 1,377       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,361         | <b>&lt;0,0001</b> | 3,721       |

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 6 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda anual de irrigação no solo arenoso.

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,094         | <b>0,028</b>      | 0,756       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,334         | <b>&lt;0,0001</b> | 4,749       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,156         | <b>&lt;0,0001</b> | 1,549       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,365         | <b>&lt;0,0001</b> | 3,867       |

Fonte: Do Autor (2021).

Tabela 7 – Resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para a demanda anual de irrigação no solo argiloso.

| Series\Test       | Kendall's tau | p-value           | Sen's slope |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------|
| <b>HADGEM 4.5</b> | 0,090         | <b>0,009</b>      | 1,150       |
| <b>HADGEM 8.5</b> | 0,362         | <b>&lt;0,0001</b> | 5,589       |
| <b>MIROC 4.5</b>  | 0,156         | <b>&lt;0,0001</b> | 1,748       |
| <b>MIROC 8.5</b>  | 0,382         | <b>&lt;0,0001</b> | 4,485       |

Fonte: Do Autor (2021).

Todos os cenários avaliados, em todos os tipos de solo, apresentaram valor-p menor que o nível de significância, o que indica que há tendência na série simulada. Assim houve tendência de aumento na demanda de irrigação anual em todos os cenários. A tendência é ainda maior nos cenários HadGEM 8.5, e MIROC 4.5 e 8.5. Os cenários HadGEM 8.5 e MIROC 8.5, apresentaram maiores valores do estimador de inclinação de Sen, o que indica que há maior tendência de autocorrelação nesses cenários.

Rodrigues (2017), verificou em seu trabalho que de acordo com as projeções dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os RCPs 4.5 e 8.5, poderão ocorrer ao longo do século, importantes alterações climáticas na BHP, como redução da precipitação e aumento da evapotranspiração potencial. Foi observado no presente trabalho que há uma tendência de aumento na demanda de irrigação pelas culturas ao longo do século, o que pode ocorrer devido à redução na precipitação e ao aumento da evapotranspiração potencial.

De acordo com Rodrigues (2017), o modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, foi o que apresentou maiores impactos hidrológicos projetados para a bacia de estudo, o que foi verificado no presente trabalho, visto que em todos os tipos de solo considerados, o HadGEM 8.5 foi o que levou a maiores valores de demanda de água para a irrigação. Ainda segundo Rodrigues (2017), a redução mais severa poderá ocorrer no período de 2071-2099, o que também foi verificado, já que a irrigação passa a ser mais necessária no final da simulação.

Comparando-se os três tipos de solo, nos cenários HadGEM 4.5 e HadGEM 8.5, o maior valor médio de demanda de irrigação foi no tipo de solo argiloso, seguido pelo solo médio e arenoso. No cenário MIROC 4.5, o solo argiloso também obteve maior demanda, seguido pelo solo arenoso e solo médio. Já no MIROC 8.5 o tipo de solo onde é necessária uma maior demanda de irrigação é o solo arenoso, seguido pelo solo argiloso e o médio.

O solo arenoso apresenta geralmente menor retenção de água que o solo argiloso, porém, apresenta na maioria das vezes uma maior infiltrabilidade. Resumidamente, a quantidade de água necessária para a irrigação pode ser considerada como a quantidade de água necessária para atender a evapotranspiração da cultura, desconsiderando a quantidade de água que é proveniente da chuva, e que efetivamente infiltra e fica armazenada no solo. Neste sentido, tanto a capacidade de retenção quanto a infiltrabilidade de um solo são fatores que podem afetar a necessidade de água para a irrigação das culturas. As simulações feitas no AquaCrop usaram os parâmetros de solo padrões fornecidos pelo programa, tanto em termos de capacidade de retenção quanto infiltrabilidade, o que levou a uma pequena diferenciação entre os tipos de solo, e uma maior influência dos cenários de mudanças climáticas na demanda de água para a irrigação. Pode-se observar que a menor capacidade de retenção da água da chuva dos solos arenosos, foi compensada pela sua maior infiltrabilidade, ou seja, em solos arenosos houve menor perda de água por escoamento superficial do que em solos argilosos, e em solos argilosos houve menor drenagem profunda que em solos arenosos.

## **CONCLUSÃO**

As simulações feitas no AquaCrop, com base nas projeções climáticas dos diferentes modelos e cenários de emissão, demonstraram que as mudanças climáticas podem afetar a demanda de água para a irrigação das culturas, visto que, o aumento da evapotranspiração e a redução da precipitação na bacia hidrográfica podem levar a um aumento na demanda de irrigação.

Os cenários que consideraram as projeções climáticas do modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, foram os que apresentaram maiores valores médios de necessidade de irrigação, o que demonstra que este modelo projeta impactos hidrológicos maiores à bacia.

Todos os cenários avaliados apresentaram uma tendência de crescimento da demanda de irrigação anual, ao longo da simulação.

As mudanças climáticas e o conseqüente aumento na demanda de água para a irrigação das culturas podem contribuir para problemas futuros na disponibilidade de água, e, os

resultados encontrados podem servir de base para futuras tomadas de decisões que venham a mitigar estes problemas.

## REFERÊNCIAS

- Alencar L. P. 2014 *Parametrização e validação do modelo AquaCrop para a cultura da cana-de-açúcar*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Bergamaschi H. & Matzenauer R. 2009 Milho. In: Monteiro J. E. B. A. *Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília: INMET.
- Campos J. H. B. C. 2010 *Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no Nordeste do Brasil usando modelagem hidrológica*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Castillo A. C. 2016 *Efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu, Rio Grande do Sul*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. 2019 *Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil*.
- Hsiao T. C., Heng L., Steduto P., Rojas-Lara B., Raes D. & Fereres E. 2009 AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parametrization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Produção agrícola municipal*. <http://www.ibge.gov.br/> (accessed 16 June 2020)
- Kendall M. 1975 *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Company, London.
- Lopes A. V. & Freitas M. A. S. 2007 A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras. *REGA*, 4(1), 5-28.
- Mann H. B. 1945 Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Minuzzi R. B. & Lopes F. Z. 2015 Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(8), 734–740.
- Oliveira C. T. 2018 *Modelo AquaCrop: calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Rodrigues J. A. M. 2017 *Impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do rio Tocantins*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Sen P. K. 1968 Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Silva A. C. S. L. 2019 *Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do nordeste do Brasil*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Silva R. A. 2018 *Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Steduto, P. 2009 Aquacrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437.

Steduto, P. 2012 *Crop yield response to water*. Rome: FAO.

XLSTAT. Xlstat add-in for Excel. 2020 New York. <http://www.xlstat.com/> (accessed 25 August 2021)

Yue S. & Wang C.Y. 2004 The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resour. Manag.*, 18, 201-218.