



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Avaliação de Alocação de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Inhanombe, Moçambique

Pedro Francisco Notisso¹, Klebber Teodomiro Martins Formiga²

¹Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás/Goiânia, Assistente Universitário, Univerdade Eduardo Mondlane, Moçambique, Criméa Leste, CEP 74655-200, pedro.notisso@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2939-3859> (autor correspondente); ² Pós-Doutorado em Hidráulica, Professor Adjunto, Escola de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás/Goiânia, Setor Universitário, CEP 74605-220, klebber.formiga@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1094-362>.

Artigo submetido em 16/10/2019 e aceite em 08/06/2020

RESUMO

A satisfação das necessidades hídricas humanas e ambientais é um tema que tem merecido atenção no âmbito da gestão e planejamento dos recursos hídricos no mundo. As incertezas sobre as possibilidades de atender as necessidades de água futuras na bacia do rio Inhanombe motivaram a realização deste trabalho. Este artigo tem como objetivo avaliar a capacidade de satisfação das necessidades de água, através da aplicação do WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). Simularam-se três cenários: o cenário de referência que corresponde a exploração atual dos recursos hídricos; dois cenários de impacto: Médio e Alto crescimento que correspondem à expansão da área irrigada e do crescimento populacional entre 2019 e 2040. Os resultados obtidos demonstram a incapacidade do sistema de satisfazer as necessidades futuras nos cenários de Médio e Alto crescimento com níveis baixos de garantias mensais e muitas falhas no fornecimento.

Palavras-chave: Demanda hídrica, bacia hidrográfica, rio Inhanombe, WEAP.

Water Allocation Assessment in the Inhanombe river basin, Mozambique

ABSTRACT

Meeting human and environmental water needs is a topic that has deserved attention in the area of water resources management and planning in the world. Uncertainties about the possibilities of meeting future water needs in the Inhanombe river basin motivated this work. This article aims to evaluate the ability to meet water needs through the application of WEAP. Three scenarios were simulated: the reference scenario that corresponds to the current exploitation of water resources; two impact scenarios: Medium and High growth corresponding to the expansion of irrigated area and population growth between 2019 and 2040. The results show the system's inability to meet future needs in medium and high growth scenarios with low monthly guarantee levels and many supply failures.

Keywords: Water demand, river basin, Inhanombe river, WEAP.

Introdução

Apesar de a água existir em grandes quantidades no planeta Terra, a sua distribuição no espaço e no tempo origina desencontros entre as necessidades e as disponibilidades e situações de risco ou de conflito. São frequentes as situações de excesso ou de *déficit*, poluição e de preços excessivos de água.

Estudos recentes demonstraram que mudanças climáticas, desenvolvimento económico, crescimento populacional, captação extensiva de água, poluição da água e mudança no uso do solo são os principais desafios que

alteraram o regime hidrológico natural na maioria das bacias hidrográficas de África, incluindo a bacia do rio Umbeluzi (Juízo e Líden, 2010; Droogers et al., 2014), a sub-bacia de Didessa (Adgolign et al., 2015), a bacia do Drâa (Johannsen et al., 2016), a bacia do rio Mara (George et al., 2018) e a bacia de Wami Ruvu (Miraji et al., 2019). A região sul de Moçambique tem sofrido nas últimas décadas desequilíbrios entre a disponibilidade e necessidades (CONSULTEC e SALOMON, 2009). Isso leva a desafios no gerenciamento da demanda de água em regiões de rápido desenvolvimento devido à

alta variabilidade espacial e temporal de recursos hídricos (Zeinali et al., 2020). As estratégias de gerenciamento de água do lado da demanda são mais acessíveis na mitigação de impactos de escassez, reduzindo as demandas anuais de água (Miraji et al., 2019).

A gestão sustentável dos recursos hídricos é um desafio quando uma região sofre com a escassez e experimenta uma crescente demanda antrópica por água (Hassan et al., 2017). O planejamento de longo prazo da gestão dos recursos hídricos enfrenta muitos desafios vinculados a alto grau de incerteza associado tanto ao uso de recurso como à disponibilidade do mesmo.

A água superficial é a principal fonte de água na bacia do rio Inhanombe (BRI), responsável em abastecer a cidade de Maxixe e o distrito de Homóine, bem como para irrigação e indústria na região. Conhecer a disponibilidade e as respectivas demandas de água ajuda a melhorar a sua gestão e distribuição para os usuários (Hussen et al., 2018). Uma situação de estresse hídrico em uma bacia hidrográfica não ocorre instantaneamente, é um fenômeno que se desenvolve ao longo do tempo (Adgolig et al., 2016). É útil fazer análise de alocação de água antes ou após a manifestação de sintomas de escassez de água, pois leva ao desenho de políticas de gestão dos recursos hídricos na bacia.

Para gerenciar sistemas hidrológicos vulneráveis, bem como influência sociais e seus conceitos de gestão são necessários modelos eficazes de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos (GIRH). Assim sendo, a simulação matemática é de grande utilidade porque, permite representar o funcionamento do sistema de forma bastante realista (Simões e Oliveiras, 2010). Vários modelos são utilizados na modelagem dos recursos hídricos com destaque para WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). Muitos pesquisadores fizeram estudos sobre alocação dos recursos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais em todo o mundo (McCartney et al., 2004; Le Roy, 2005; SWECO e ASSOCIATES, 2005; Arranz e McCartney, 2007; Juárez e Liden, 2010; Droogers et al., 2014; Johannsen et al., 2016; Omar; Moussa, 2016). Esses estudos indicaram que a avaliação dos recursos hídricos foi realizada nas escalas de bacias e sub-bacias hidrográficas em muitos países para um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. O modelo WEAP é considerado o método disponível mais adequado para GIRH no nível de bacia, devido ao seu suporte robusto à

tomada de decisões, recurso de geração de cenários, baixa intensidade de dados e capacidade de lidar com as demandas agregadas e desagregadas de gerenciamento de água de vários setores (Purkey et al., 2009; SEI, 2016; Faiz et al., 2018).

Na BRI destacam-se os trabalhos de Hidroprojecto (1998) e CONSULTEC e SALOMON (2009). Estes estudos enfatizaram o levantamento da disponibilidade hídrica da província de Inhambane e as respectivas demandas. O primeiro está um pouco desatualizado no que concerne às demandas hídricas e o último não utilizou modelo de simulação orientado pela demanda. Ao contrário dos dois estudos anteriores, este estudo simula os impactos da demanda de água superficial para regiões de rápido crescimento populacional, aplicando o modelo WEAP com base em cenários futuros de demanda de água na bacia de Inhanombe, em Mocimboa do Oswaldo. Portanto, este trabalho utilizou sempre que foi necessário os dados e resultados desses trabalhos. A elaboração deste trabalho vem preencher uma lacuna nos estudos sobre a satisfação das necessidades de água urbanas e agrícolas na bacia recorrendo a utilização de modelo de simulação matemática.

O objetivo deste trabalho é avaliar a capacidade atual e futura do sistema hídrico de satisfazer as demandas hídricas dos setores urbano e agrícola na região.

Material e métodos

Área de estudo

A bacia do rio Inhanombe situa-se na província de Inhambane no sul de Moçambique. A BRI tem uma área de 1.284 km², com cerca de 66 km de comprimento do rio principal, desaguardo na baía de Inhambane (figura 1). A precipitação média anual é de 850 mm, variando de 600 a 1100 mm, do interior para litoral. O período chuvoso vai de novembro a março, apresentando uma crista em janeiro e fevereiro.

A área de estudo abrange sub-bacias de três cursos de água: Inhanombe, Domo Domo e Furvela. Estimativas feitas por Hidroprojecto (1998) indicaram uma disponibilidade hídrica de 47,4 hm³/ano de água superficial em toda bacia. Em 2009, estimou-se em 34,8 hm³/ano de águas superficiais e 17,0 hm³/ano de águas subterrâneas (CONSULTEC e SALOMON, 2009).

A maior demanda de água na bacia é a irrigação agrícola com cerca de 9,4 hm³/ano representando cerca de 80,3% da demanda total, seguida de abastecimento doméstico com 2,0

hm³/ano para a cidade de Maxixe e 194,7 m³/ano para o distrito de Homóine correspondentes a 17,1 e 0,9%, respectivamente, os restantes 1,8% correspondem a indústria e pecuária. A demanda total estimada de água superficial em 2009 foi de 11,7 hm³/ano, mas prevê-se que aumente para 30,0 hm³/ano em 2035 (CONSULTEC e SALOMON, 2009).

A população abastecida na bacia cresceu de menos de 37.000 em 1997 para cerca 85.097 em 2017 (INE, 2007; 2019). A demanda de água

para irrigação é de 17.181 m³/ha/ano estimada por (CONSULTEC e SALOMON, 2009). A bacia tem uma área potencial para agricultura de 1.344 ha, destes apenas 555 ha são utilizados atualmente. O parque industrial é quase inexistente e não se espera um crescimento considerável. Não foi possível obter as projeções de demanda de água para pecuária. Por esta razão, as demandas industrial e pecuária não foram incluídas neste estudo.

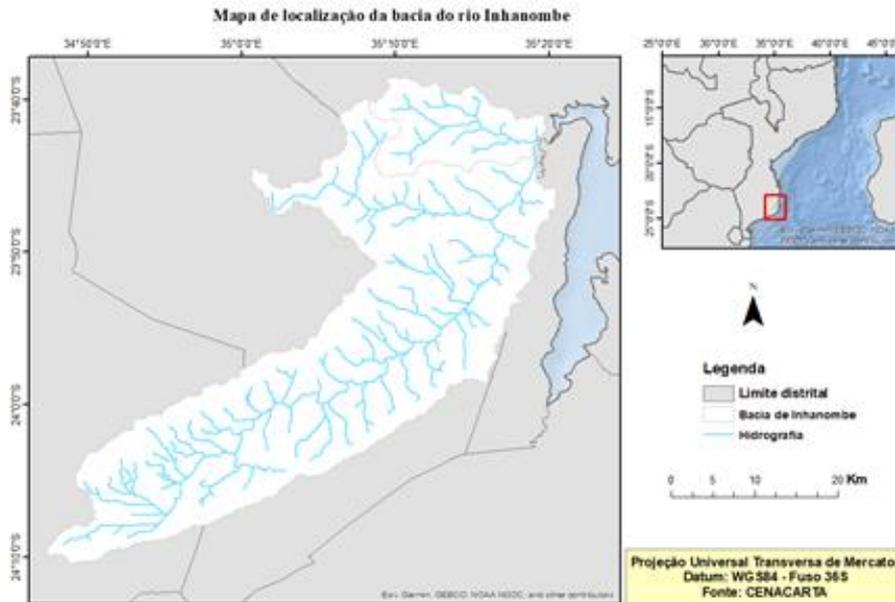


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Inhanombe

A BRI apesar de pequena, tem uso intenso da sua água (CONSULTEC e SALOMON, 2009) sendo de destacar o abastecimento à cidade da Maxixe e à irrigação. O aumento da demanda de água para abastecimento doméstico e irrigação agrícola na bacia é cada vez mais preocupante numa altura de grandes incertezas de variáveis hidrológicas e climáticas na região de África Austral (Droogers et al., 2014).

Não há registro de conflitos de uso de água na bacia, mas a necessidade de satisfazer a demanda cada vez maior para o desenvolvimento econômico e social na bacia pode originar conflitos no futuro devido à escassez de água. Segundo Wang et al. (2007) os conflitos surgem frequentemente quando diferentes usuários de água (incluindo o meio ambiente) competem por um suprimento limitado de água. A alocação de água deve considerar três princípios fundamentais: equidade, eficiência e sustentabilidade (UNESCAP, 2000). Equidade significa que os recursos hídricos dentro de uma bacia hidrográfica devem ser compartilhados de

forma justa por todas as partes interessadas. A eficiência diz respeito ao uso econômico dos recursos hídricos com relação à minimização de custos e maximização de benefícios. Sob sustentabilidade, a água é utilizada economicamente tanto agora como no futuro, de tal forma que o meio ambiente não seja prejudicado. De acordo com Wang et al. (2007), não é fácil cumprir todos os três princípios para um problema de alocação de água na escala de bacia hidrográfica.

Etapas de modelagem

A Figura 2 mostra a estrutura geral de modelagem hidrológica aplicada neste trabalho. A primeira etapa da modelagem se deu com a construção da rede no WEAP. Foram utilizados os planos de informação em formato vetorial dos rios que estão dentro do limite da bacia. A partir da inserção desses planos de informação foi possível desenhar o traçado dos rios e os locais de consumo. O tributário é representado por nó de fluxo (linha azul e ponto). Os locais de consumo

são estruturados por três nós de demanda e canais de transporte (pontos vermelhos e setas verdes, respectivamente) mostrado na Figura 3. Para além disso, foi incorporado um nó de medidor de vazão na foz (ponto cor azul). A água superficial foi definida como única fonte de distribuição para todos os locais de consumo. Segundo Arranz e McCartney (2007), a estrutura de dados e o nível de detalhe podem ser personalizados para corresponder aos requisitos de uma análise específica e restrições impostas por limitação de dados. Neste estudo, a demanda para abastecimento foi feita separadamente para as duas cidades, enquanto para as áreas de irrigação foram agrupadas num único nó de demanda,

conforme estratégia adotada por Omar e Moussa (2016) no estudo sobre o gerenciamento de água no Egito.

A segunda etapa consistiu na definição de dados de entrada. Os dados para os locais de consumo foram nível de atividade anual, consumo anual, taxa de crescimento, consumo *per capita* e uso de água por hectare, assim como os dados de projeção futura da demanda doméstica para Maxixe fornecidos pelo Fundo de Investimento e Património de Águas (FIPAG). Para dados hidrológicos, foram necessários os fluxos afluente e efluente e, precipitação fornecidos pela ARA-Sul e Unidade de Gestão da Bacia do Save (UGBS).

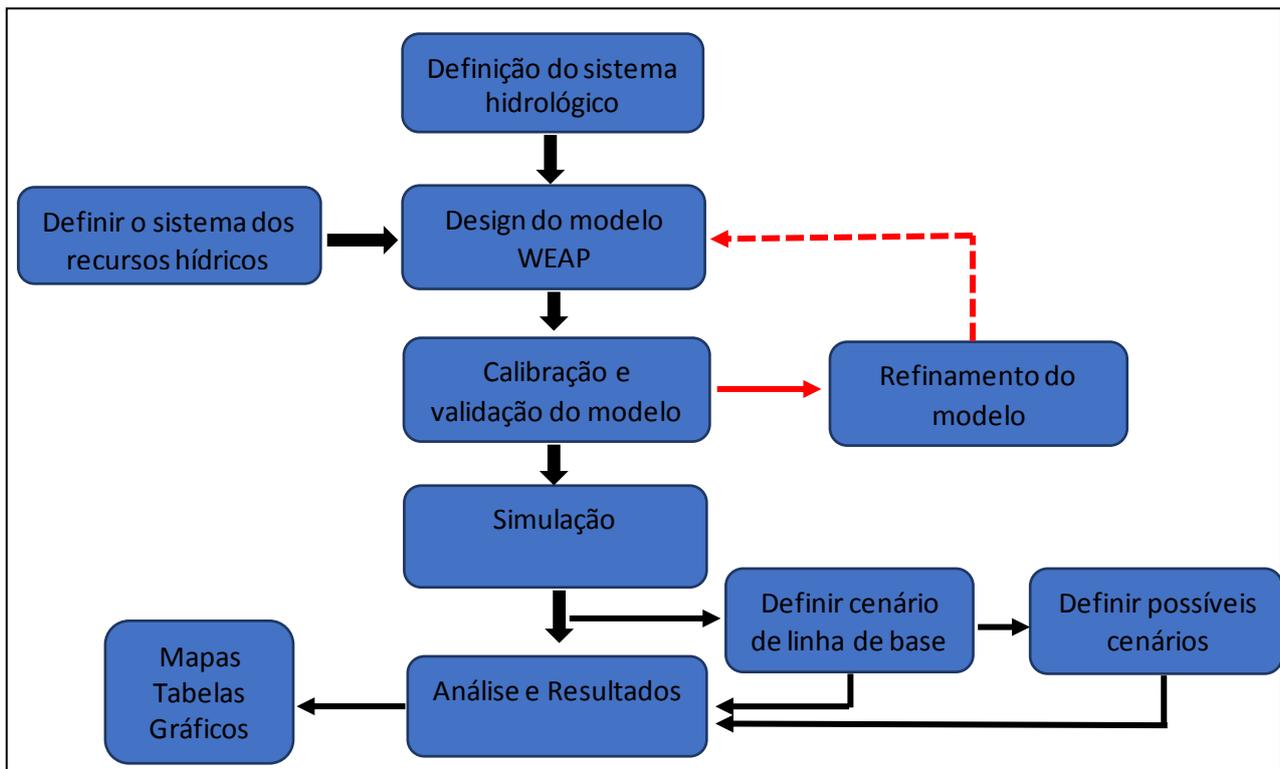


Figura 2 - Estrutura do modelo WEAP

De acordo com Arranz e McCartney (2007), o modelo WEAP é aplicado configurando o sistema para simular um ano base recente, para o qual a disponibilidade de água e as demandas podem ser determinadas com confiança. As simulações foram executadas mensalmente, o ano 2009 foi escolhido como o ano base, por motivos de disponibilidade de dados e por ser considerado um ano sem muitas alterações no sistema como um todo. No ano base são inseridos somente dados do sistema hídrico referentes a esse ano. A entrada de vazões dos rios afluentes (m^3/s), as demandas domésticas ($m^3/hab/ano$), as demandas

de irrigação (m^3/ha) são referentes a esse ano, informação detalhada sobre dados de entrada pode ver Yates et al., 2005; SEI, 2015.

Todos os locais de consumo são atribuídos prioridades que variam de 1 a 99, sendo 1 a prioridade mais alta e 99 a mais baixa. Como não existe nenhuma infraestrutura de armazenamento de água, foi adotada a prioridade 1 para todos os locais de consumo, incluindo a vazão mínima ecológica, mantendo assim a forma atual de distribuição de água na bacia. A avaliação da capacidade de satisfação das necessidades de

água foi feita recorrendo a estatísticas como garantia de abastecimento incorporada no modelo.

A terceira etapa foi o desenvolvimento de cenários de impacto para o período de 2019 a 2040. O modelo WEAP fez análise do sistema hídrico no atendimento das atuais e futuras demandas de água, através da simulação de cenários. Para o alcance dos objetivos, foram testados dois cenários de impacto visando principalmente duas demandas: abastecimento doméstico e irrigação. Cada cenário é definido pelo período de simulação, por um conjunto de

afluências e por um conjunto de necessidades (Yates et al., 2005). Esses cenários mostram diferentes mudanças socioeconômicas sob o pressuposto de desenvolvimento da região. A elaboração de cenários seguiu a abordagem adotada por Droogers et al. (2014) e Leong e Lai (2017). Os incrementos se devem à consideração do crescimento demográfico e das áreas irrigadas, e o próprio programa calcula a projeção para os anos de interesse.

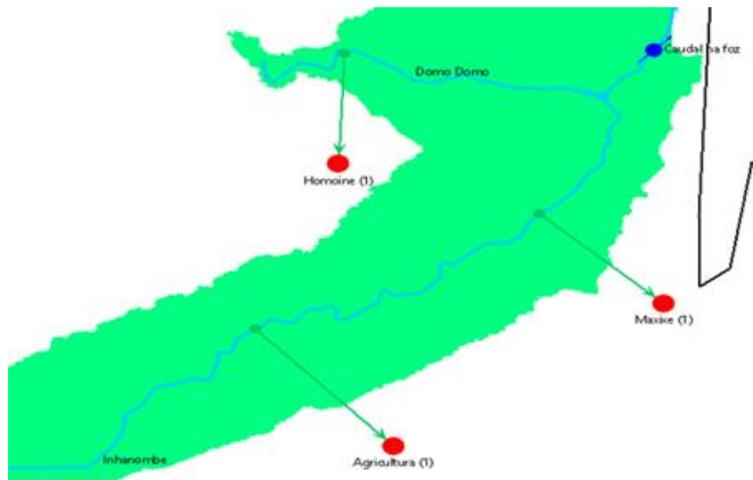


Figura 3 – Esquematização do modelo de alocação de água

Cenário de Referência - representa a situação atual, foi modelado e projetado nas condições de 2009. Levou em consideração os seguintes pressupostos: crescimento populacional para cidade de Maxixe e aumento de áreas de irrigação (1,5%) e crescimento populacional para distrito de Homoíne (1,6%). Foram inseridos no módulo dados 68.988 e 6.492 habitantes para Maxixe e Homoíne, respectivamente e, uma área irrigada de 555 ha. A partir deste cenário, foram criados dois cenários de impacto para o período de 2019 a 2040.

Cenário de Crescimento Médio: descreve o crescimento de população de 2,5 e 2,6% para Maxixe e Homoíne, respectivamente e aumento de irrigação de 2,5%.

Cenário de Crescimento Alto: apresenta um crescimento de locais de demanda obedecendo os seguintes pressupostos: crescimento para Maxixe (3,8%), crescimento para Homoíne (4,0%) e aumento de áreas de irrigação (3,0%).

A quarta etapa consistiu na definição de cenários hidrológicos. Para isso, as condições hidrológicas observadas de 1988 a 2018 foram

utilizadas para o futuro, selecionando para cada ano no futuro um ano aleatório no passado. Para isso, recorreu-se a distribuição empírica discreta e aplicando o método transformação inversa. Em relação à modelagem hidrológica foi utilizado o *Water Year Method* para gerar uma série de afluências no sistema uma vez que não existem dados observados do futuro. Os anos hidrológicos são caracterizados por uma percentagem de precipitação em relação à média (CCG-UCC e SEI, 2009). Os mesmos autores realçam que um ano considerado de precipitação normal apresenta coeficiente 1 e para definir os outros coeficientes

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{s,i} - q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{o,i} - \bar{q}_o)^2}$$

basta retirar ou
adicionar a
diferença de
precipitação

que cai anualmente. Partindo desse pressuposto, foram determinados os coeficientes dos restantes anos hidrológicos de seguinte forma: muito seco (0,65), seco (0,86), normal (1,0), chuvoso (1,1) e muito chuvoso (1,3).

A quinta e última etapa foi a calibração e aplicação do modelo. Para avaliar o desempenho

do modelo foi calculado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) na vazão. Este coeficiente é definido por Leong e Lai (2017) como:

(1)

Onde:

$Q_{o,i}$ = vazão simulada

$Q_{s,i}$ = vazão observada

\bar{Q}_o = vazão média observada no período analisado.

Foi também calculado o Bias (desvio relativo): quanto menor o Bias, melhor correspondência entre os dados observados e simulados. Um Bias positivo indica superestimação e negativo subestimação. O Bias deve estar entre -5% e 5% e se define segundo CCG-UCC e SEI (2009) como:

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o] \quad (2)$$

Onde:

\bar{Q}_s = vazão média simulada

\bar{Q}_o = vazão média observada

Resultados e discussão

Tendência da precipitação

Para avaliar o processo de mudança hidrológica na bacia foi analisada a tendência de precipitação anual (figura 4) dos últimos 53 anos (1966 – 2018) para a sub-bacia inferiorl. A falta de séries longas de precipitação nos postos (P-1253 e P-791) situados nas sub-bacias superior intermédia, respectivamente, justificaram o uso de de dados do posto (P-662). Na análise dos

resultados da série temporal da precipitação, foi confrontado o gráfico na fase de Análise Exploratória de Dados (EDA), com a reta de tendência e a média móvel de 10 anos. Pode-se observar que o ano de 1990 apresentou a menor ocorrência de chuvas, 329,8 mm. Observa-se também que no período entre 2012 e 2018 as precipitações apresentam valores de menor amplitude.

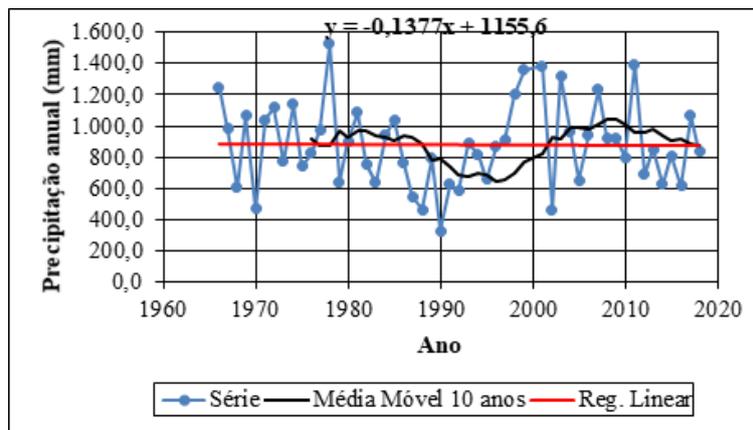


Figura 4 – Comportamento da precipitação total anual

De acordo com a Figura 4, a média móvel de 10 anos evidencia uma tendência decrescente até o ano de 1996 e uma tendência crescente até 2009 e volta a ter uma tendência decrescente até o ano de 2018.

Para certificar o resultado da EDA foi adotada a abordagem estatística no *software* TREND, tendo em conta dois níveis de significância 5% e 1% considerando apenas dois testes para tendências Mann -Kendall e Regressão

Linear. Os resultados de análise de tendência realizados pelo TREND, para a precipitação total anual, verifica-se que não houve significância estatística para todos os níveis de significância avaliados como mostrado na tabela 1. Portanto, observou-se a não existência de crescimento ou decréscimo de precipitação anual, comportando-se dentro da regularidade do regime hidrológico.

Tabela 1 – Resultados dos testes para precipitação total anual

Testes estatísticos	Teste	Valor crítico tabelado		Resultados
		$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	
Mann-Kendall	-0,146	1,96	2,576	NS
Linear regression	0,098	2,009	2,678	NS

Os valores apresentados na tabela 1 não demonstram nenhuma tendência histórica de maior variabilidade, o que pode ser explicado através de ocorrência de tendência positiva no período chuvoso e ocorrência de tendência negativa no período seco, por isso, na análise da precipitação anual a tendência do período seco anula a tendência do período chuvoso. A falta de tendência indica a necessidade de levar em consideração os efeitos da escala espacial nas variáveis hidrológicas (Guzha et al., 2018).

Não se sabe se este comportamento da precipitação é semelhante para toda a bacia de Inhanombe. No entanto, uma análise completa de mudança hidrológica está fora do escopo deste

estudo. Se a não significância estatística for semelhante para toda a bacia e se continuar, não são esperadas condições de muita seca no futuro.

Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo visa obter um conjunto de parâmetros hidrológicos que permitem ter uma representação de fluxos que se assemelhem aos dados históricos da maneira mais próxima possível (CCG-UCC e SEI, 2009). Para isso, comparou-se a vazão mensal observada versus simulada à jusante dos locais de consumo como sugerido por (George et al., 2018).

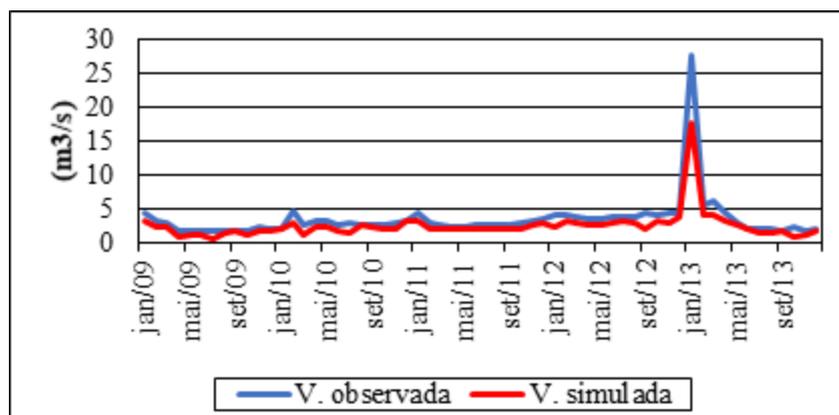


Figura 5 – Calibração do modelo

A figura 5 mostra a calibração do modelo na vazão média mensal entre 2009 e 2013. O modelo apresentou resultados não confiáveis, pois subestimou em cerca de -27%, como mostrado na tabela 2. Feita a correção nos dados de entrada e na rodagem do modelo foi possível obter vazões que se ajustassem aos valores observados (Figura 6) permitindo a validação do modelo (tabela 2). A literatura recomenda $NSE \geq 0,65$ e $Bias \leq 5$ para considerar o modelo satisfatório (CCG-UCC e

SEI, 2009). O valor de Bias (-5,5%) está fora do intervalo recomendado pela literatura, pode ser explicado pelo fato de não ter sido considerado o consumo de água para indústria e pecuária, portanto, pode ainda ser considerado satisfatório. Diferenças mínimas na validação de modelos podem ser desprezadas devido a várias incertezas no processo de modelagem (Faiz et al., 2018).

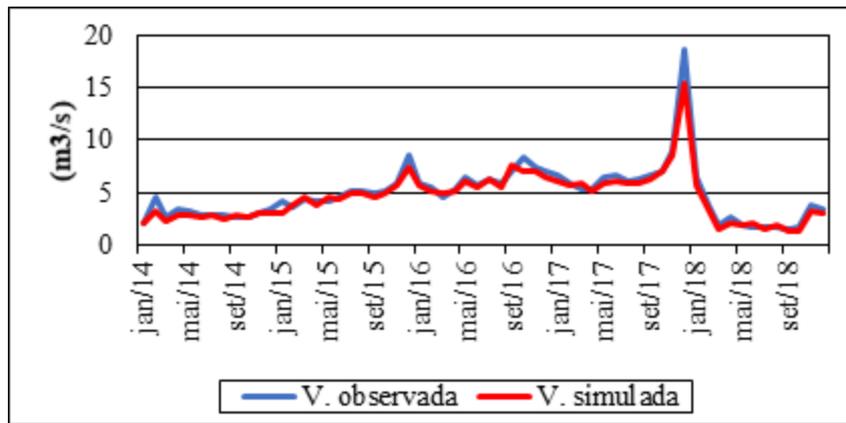


Figura 6 – Validação do modelo

Tabela 2 – Funções objetivas

Parâmetro	Calibração		Validação	
	Bias (%)	NSE	Bias (%)	NSE
Vazão média mensal	-27,1	0,76	-5,5	0,81

Cenários de impacto

Aumento de locais de demanda

A simulação do cenário de referência permitiu validar o modelo e corrigir um conjunto de erros existentes nos primeiros ensaios do modelo. Após aplicar as regras de prioridade indicadas acima e correções nos dados de entrada o programa apresentou resultados válidos. A população estimada pelo modelo para a cidade de Maxixe e Homoíne para o ano 2017 é de 77.726 e 7.371, respectivamente. Comparados com os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), referentes ao censo 2017, verifica-se que os resultados do modelo estão próximos da realidade, apesar da sua subestimação. Os resultados do INE (2019) apontam para 102.346 e 12.961 habitantes para Maxixe e Homoíne, respectivamente.

A população total projetada para 2040 é de 120.086 como resultado de taxas de 1,5 e 1,6%

ao ano para Maxixe e Homoíne a partir da população total de 75.490 em 2009 no cenário de Referência (figura 7). O cenário de crescimento Médio pressupõe que a população cresça a uma taxa média de 2,5 e 2,6% para Maxixe e Homoíne, de modo prever o impacto do crescimento populacional para a oferta e demanda de água para o período de 2019 a 2040 na bacia com o atual sistema de uso e abastecimento de água. A população estimada para 2040 é de 162.732 superior ao valor projetado no cenário de referência (figura 7). A população em 2040 para o cenário de crescimento Alto foi estimada em 241.156, o dobro da população do cenário de Referência. Em países em desenvolvimento, os impactos demográficos impulsionarão amplamente a extensão de zonas de estresse hídrico (Leong e Lai 2017; Miraji et al., 2019).

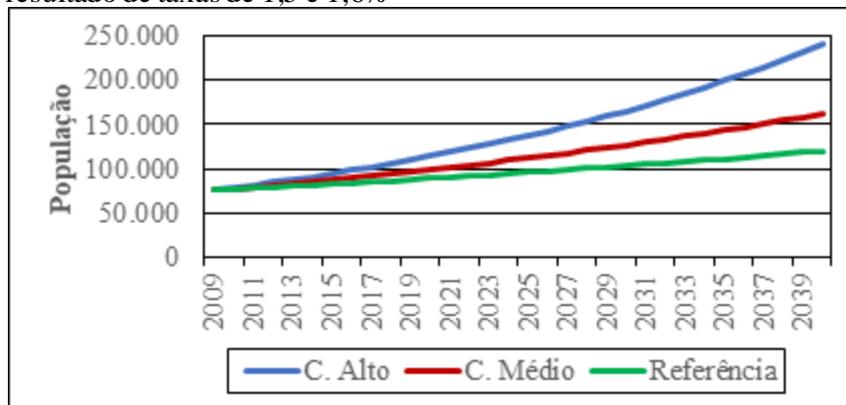


Figura 7 – Crescimento da população

A área irrigada foi estimada em 880,5 ha em 2040 no cenário de Referência. Considerando o aumento da área de irrigação de 2,5% ao ano, espera-se uma área de 1.193,2 ha em 2040 (figura 8). A área de irrigação apresenta o máximo de 1.387,5 ha no cenário de crescimento Alto, atingindo área potencial para irrigação na bacia. A expansão da área irrigada implica a diminuição de

florestas com inúmeras consequências daí resultantes. A perda da cobertura florestal resulta na diminuição de fluxos dos rios (Guzha et al., 2018) especialmente em anos secos (Dehghanipour et al., 2019) reduzindo a disponibilidade hídrica devido ao aumento da competição por água.

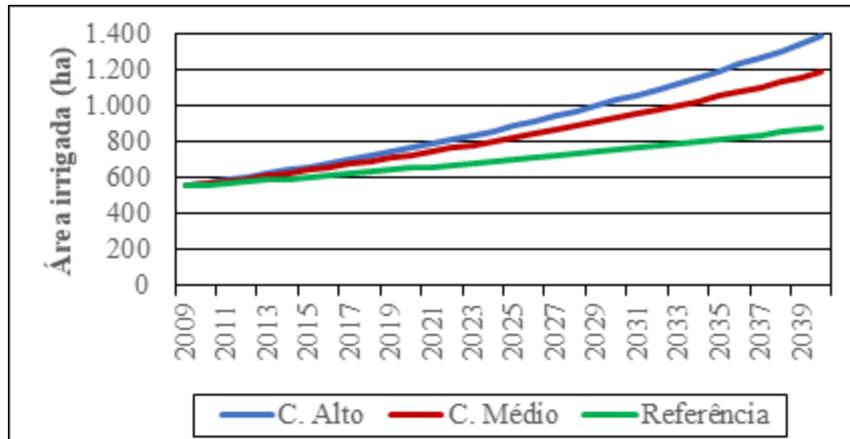


Figura 8 – Aumento de área de irrigação (ha)

Demanda de água

Em relação às demandas no ano 2018 para abastecimento doméstico à cidade de Maxixe e Homóine são 4,1 e 0,3 hm³, respectivamente. Comparados com os valores registrados pelo FIPAG nota-se que o modelo subestimou em 3,0% para a cidade de Maxixe. Não foi possível obter dados de abastecimento doméstico para Homóine para efeitos de comparação. A demanda hídrica para irrigação em 2017 segundo Direção Provincial de Agricultura foi de 10,3 hm³, inferior ao valor de 10,7 hm³ estimado neste estudo. A superestimação da demanda na irrigação (3,9%) é devido a contabilização progressiva do uso de água neste setor, o modelo não previu a não utilização de água em algumas áreas agrícolas.

A demanda de água estimada para abastecimento doméstico à cidade de Maxixe é de

9,5 e 13,2 hm³ para os cenários de Médio e Alto crescimento, respectivamente em 2035. Estes valores são superiores às demandas de 6,6 e 9,9 hm³ estimados pela CONSULTEC e SALOMON (2009) para o mesmo ano. A correlação do rápido crescimento populacional e da diminuição de precipitação nas bacias africanas aumenta a demanda e escassez de água (Miraji et al., 2019). O cenário de Referência apresenta projeção de demanda de 7,4 hm³ em 2035. Em 2040 prevê-se uma demanda na ordem de 16,4 hm³ para Alto crescimento (figura 9), que é o dobro da demanda do cenário de Referência (8,2 hm³). Em contexto de má gestão e desperdício da água, e com o rápido crescimento populacional, aumenta muito mais a demanda por água (Zuffo e Zuffo, 2016).

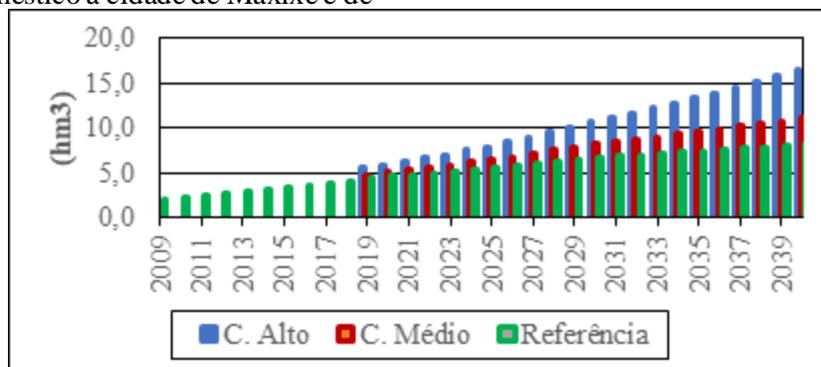


Figura 9 – Demanda de água à cidade de Maxixe (hm³)

O aumento da demanda de água de abastecimento doméstico para o distrito de Homoíne é em resposta ao crescimento populacional deste local. A demanda prevista é de 0,8 e 0,9 hm³ em 2040 para os cenários de Referência e Médio crescimento (figura 10). A

alta taxa de crescimento populacional se reflete em maior demanda de água por causa disso, o valor estimado é de 1,4 hm³ em 2040, que é quase duas vezes a demanda do cenário de Referência. Em casos de aumento da taxa de cobertura os valores da demanda serão muito maiores.

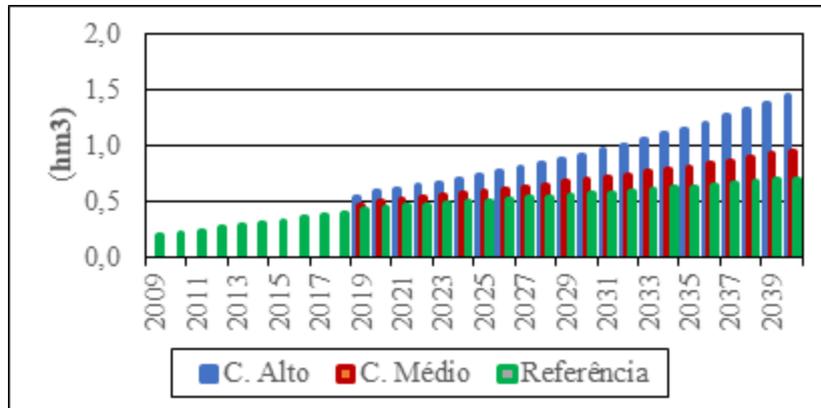


Figura 10 – Demanda de água para Homoíne (hm³)

A demanda de água de vários campos agrícolas ao longo do rio Inhanombe foi agrupada num único nó para estimar a demanda total dentro da bacia. Prevê-se demanda de 15,1 e 20,5hm³ em 2040 para os cenários de Referência e Médio crescimento, respectivamente (figura 11). A irrigação agrícola continuará a demandar mais água que o abastecimento doméstico junto (Maxixe e Homoíne), por exemplo, em 2040 a

demanda para irrigação será de 23,8 hm³ contra 17,8 hm³ de abastecimento doméstico no cenário de Alto crescimento. Mas mostra uma redução em termos relativos, pois em 2019 a irrigação respondeu por 68,1% (12,8 hm³) da demanda total, este valor baixa para 57,1% em 2040. O abastecimento doméstico mostra forte crescimento em 2040, será responsável por 42,7% da demanda total de água na bacia acima de 31,4% de 2019.

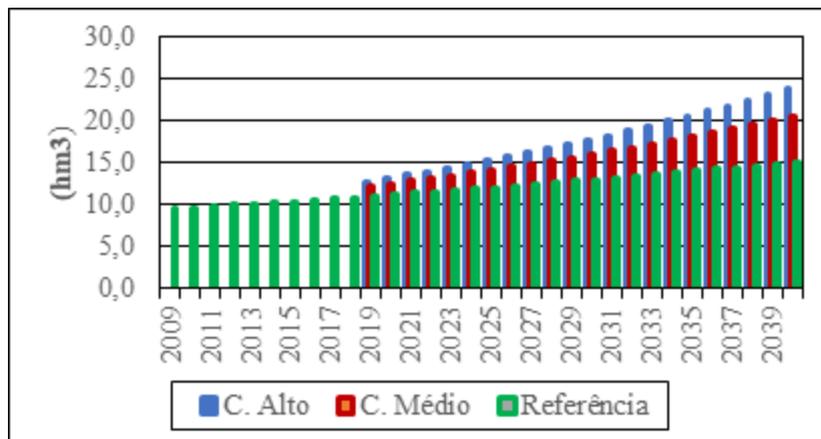


Figura 11 – Demanda de água na irrigação (hm³)

A demanda total aumenta progressivamente como resposta ao aumento populacional e da área de irrigação. A demanda de água projetada se eleva a um máximo de 24,0 hm³ em 2040 comparada à demanda inferior existente de 11,8 hm³ (figura 12), que é quase o dobro da demanda da situação atual (2009) no cenário de

Referência. Como resultado do aumento médio dos locais de consumo, a demanda de água para o cenário de Crescimento Médio é estimada em 32,5 hm³, um incremento de 35,4% se comparado com o cenário anterior. No cenário de Alto crescimento foi projetada a demanda de 41,7 hm³ em 2040, quase duas vezes o valor do cenário de referência.

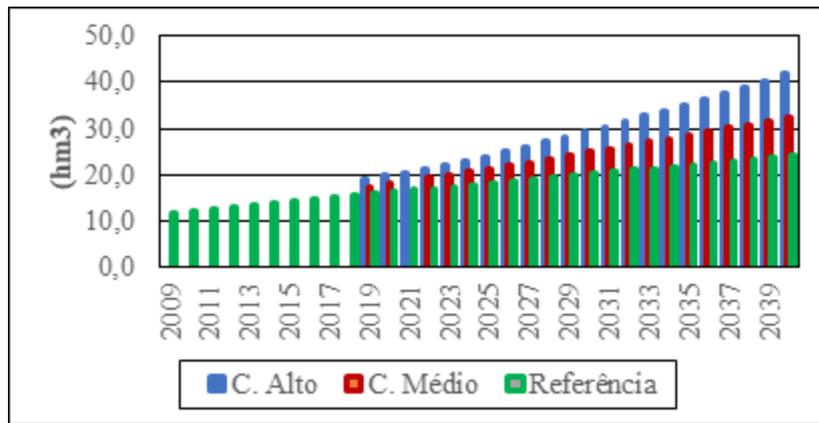


Figura 12 – Demanda total de água (hm³)

A demanda total de água no cenário de Alto crescimento é projetada em 34,9 e 41,7 hm³ em 2035 e 2040, respectivamente, ultrapassando o valor de água disponível de 34,8 hm³. Em 2040 a diferença entre a disponibilidade e as necessidades é estimada em 6,9 hm³. Essa lacuna pode ser compensada pela utilização de água subterrânea. Porém, mesmo com exploração de água subterrânea não será sustentável a longo prazo, sendo necessário redirecionar as estratégias de gestão de água no lado da demanda. A disponibilidade hídrica limitada é o principal desafio enfrentado pelo sistema dos recursos hídricos no sul de Moçambique. Do lado da demanda, existem muitos desafios por superar como altas perdas de água na rede de distribuição e falta de conscientização pública no setor de água.

Demanda de água não atendida

Não se espera por condições hidrológicas muito favoráveis no futuro por isso nem todas as necessidades de água futuras podem ser satisfeitas ao longo do período de estudo em função dos pressupostos assumidos. Prevê-se aumento contínuo de demanda de água não atendida tanto para irrigação assim como para abastecimento doméstico à cidade de Maxixe.

Para a cidade de Maxixe a demanda não atendida começa em março de 2029 no cenário de Alto crescimento, cinco anos antes (2034) que o cenário de Médio crescimento (figura 13). A projeção da demanda não atendida é de 2,5 hm³ em 2040 para o cenário de Alto crescimento e cerca de 1,5 hm³ no cenário de Médio crescimento.

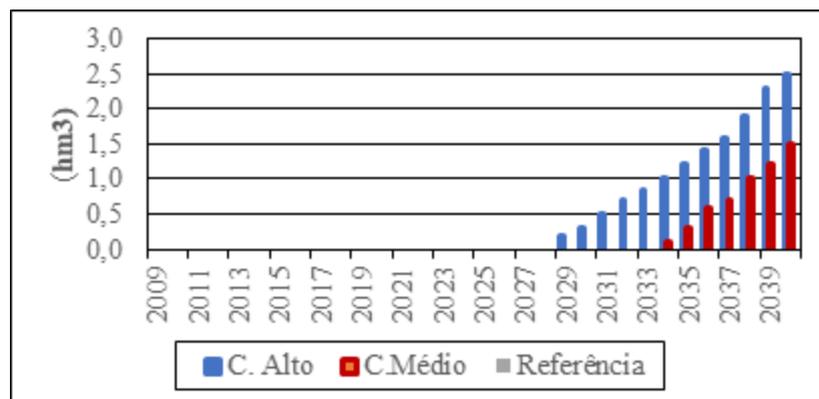


Figura 13 – Demanda anual não coberta na cidade de Maxixe (hm³)

O aumento da demanda não atendida é devido ao crescimento populacional, declínio do fluxo de água para as captações devido a variabilidade temporal e espacial da precipitação (Suryadi et al., 2018). A baixa cobertura de necessidades de água a partir de 2029 se deve em parte ao fato de a irrigação agrícola se encontrar à

montante da cidade de Maxixe. E no desenho do modelo tanto a irrigação assim como o abastecimento doméstico à Maxixe foi atribuído a prioridade 1, por isso o modelo aloca água simultaneamente aos dois setores. O fato de não se ter considerado o fluxo de retorno da irrigação pode também estar associado a baixa cobertura no

setor doméstico, pois a captação de água de abastecimento doméstico à Maxixe é feita a jusante do setor de irrigação.

Para minimizar a escassez de água no futuro é preciso apostar fortemente na gestão como por exemplo redução de perdas para cerca de 25%, valor máximo recomendado pelo Banco Mundial e educação ambiental voltada ao uso eficiente de água de modo que as pessoas entendam qual é a gestão adequada e o valor de água e de outros recursos naturais numa perspectiva de médio a longo prazos.

A demanda não atendida na irrigação começa quatro meses mais cedo que a demanda

não atendida no abastecimento à Maxixe, em finais de 2028 para o cenário de Alto crescimento e 2033 no cenário Médio (figura 14). A demanda não atendida para o ano 2040 é estimada em 2,1 e 3,8 hm³ para os cenários de Médio e Alto crescimento, respectivamente, apresentando variações significativas ao longo do período de simulação, em resultados de vazões afluentes originadas pelos cenários hidrológicos previstos. A expansão da área irrigada, a variabilidade da precipitação e o aumento de desmatamento contribuem para o aumento da demanda não atendida (Miraji et al., 2019).

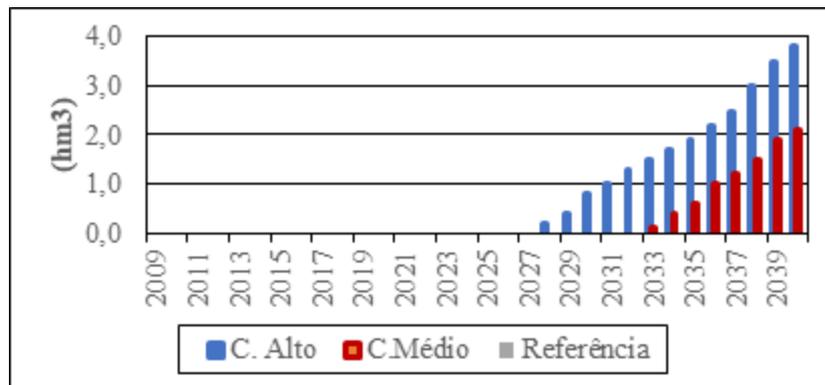


Figura 14 – Demanda não coberta na irrigação (hm³)

O estudo de CONSULTEC e SALOMON (2009) sugeriu o uso de água subterrânea para colmatar a escassez de água superficial com o aumento da área irrigada. A utilização integrada de águas superficiais e subterrâneas pode ser uma boa estratégia para lidar com escassez (Dehghanipour et al., 2019; Miraji et al., 2019). Embora os eventos de recarga (25 mm/ano) sejam suficientes para manter a água do lençol freático estável o uso de água subterrânea é apenas uma solução temporária e não sustentável a longo prazo, porque a quantidade estimada é de apenas 17,0 hm³/ano. A redução da cobertura florestal favorece o escoamento superficial em detrimento de infiltração e recarga dos aquíferos (Guzha et al., 2018; Zeinali et al., 2020).

É preciso considerar que a simulação manteve constante o valor médio de uso de água na irrigação (17.181 m³/ha/ano). O aumento da eficiência do uso da água na agricultura é uma solução amplamente sugerida para o combate a escassez de água (Zuffo e Zuffo, 2016; Hipólito e Vaz, 2017). Assumindo que maior parte da irrigação é feita por gravidade e por aspersão responsáveis por eficiência de rega de 30 e 75%, respectivamente, em Moçambique. Portanto, é

necessário que se adote várias medidas de redução desse valor, através do melhoramento da rega por gravidade e o incentivo da rega por gotejamento, este último com uma eficiência de 90% quando bem feita.

Os recursos hídricos estão intimamente ligados ao clima, e a perspectiva de mudança climática global tem sérias implicações para o futuro (Rodell et al., 2018). A variação da distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos na bacia tornará as consequências de escassez de água mais severas, a menos que sejam implementadas estratégias de gerenciamento de água do lado da demanda. A figura 15 mostra a projeção de demanda total anual não atendida com base nos três cenários: Referência, Crescimento Médio e Crescimento Alto. O cenário de Referência não apresenta nenhum *déficit* ao longo do período da simulação. Nos cenários Médio e Alto crescimento verifica-se maior demanda não atendida para irrigação que em alguns casos chega a ser o dobro da demanda não atendida para abastecimento doméstico à Maxixe. Quanto ao atendimento às demandas, os resultados mostram que as vazões fonecidas garantem o provimento

de água a 100% em todos os locais de consumo e

todos os cenários até 2027.

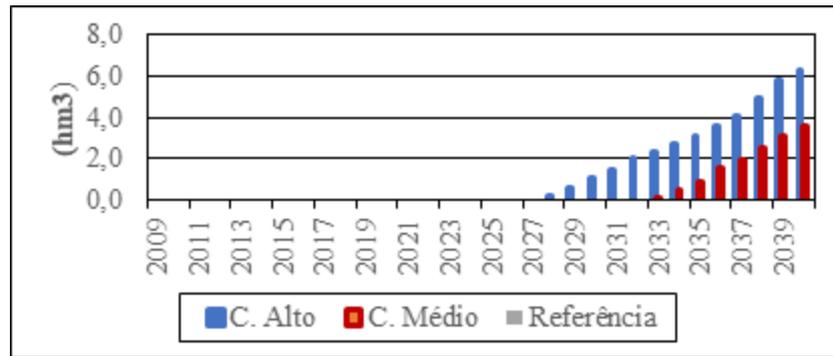


Figura 15 – Demanda total anual não coberta

A demanda de água no distrito de Homoíne é satisfeita totalmente durante todo o período da simulação. Para além de apresentar menor demanda, importa frisar que o seu abastecimento é feito pelo rio Domo Domo e a irrigação neste rio é insignificante por isso não foi considerada neste estudo, isso faz com que o distrito de Homoíne tenha atendimento total.

Os resultados da simulação demonstram que, com alta taxa de crescimento populacional e aumento de área de irrigação a bacia de Inhanombe enfrentará *déficits* hídricos a partir de 2028, que é apenas cinco anos mais cedo do que o cenário Médio. No entanto, a demanda anual não atendida por alta taxa de crescimento populacional e alta taxa de aumento de área de irrigação indica um máximo de 6,3 hm³ em 2040, o que é quase o dobro da demanda anual não atendida do cenário Médio (3,6 hm³). Verifica-se que o nível de satisfação diminuiu para os grandes usuários (abastecimento à Maxixe e irrigação) corroborando com os resultados obtidos por Juízo e Liden (2010).

A análise das diferentes demandas anuais não atendidas na irrigação e abastecimento doméstico à Maxixe indicam que a demanda não atendida aumentou em todos os cenários como resultado da expansão de terras agrícolas irrigadas e do aumento populacional. Isso implica que com as taxas de médio e alto crescimento da população e de área irrigada mostraram um impacto significativo na demanda de água em uma perspectiva de longo prazo e reflete a necessidade de desenho de planos de gerenciamento de água, redução de perdas de água, uso de sistemas de

rega de maior eficiência para compensar esse *déficit*. O abastecimento doméstico à Maxixe pode estar comprometido se se comprovar o aumento das áreas de irrigação e mantidos os atuais valores de uso de água por hectare na agricultura. Face a este cenário, pode-se recorrer a duas saídas como aumentar a oferta ou métodos de rega mais eficientes. As maneiras de aumentar a oferta de água é por meio da conservação do recurso, alcançado pelo aumento da eficiência no uso pela irrigação e redução de perdas nas redes de distribuição (Zuffo e Ziffo, 2016; Miraji et al., 2019).

Acredita-se que as vazões afluentes seriam suficientes para garantir a satisfação das necessidades de todos os usuários nos três cenários se fossem acompanhadas pela construção de infraestrutura de armazenamento de água ao longo do rio Inhanombe. Para além de armazenar e fornecer água para irrigação e abastecimento doméstico à Maxixe e Homoíne, serviria também para o encaixe das cheias como sugerido também por (CONSULTEC e SALOMON, 2009).

Indicadores de desempenho

A garantia na alocação de água é diferente nos três cenários, apenas o cenário de Referência apresenta garantia mensal e anual satisfatório, sendo regular e insatisfatório para os cenários Médio e Alto crescimento, respectivamente. Observa-se na tabela 3 que as falhas no fornecimento de água têm duração média superior a dois meses nos cenários de Médio e Alto crescimento.

Tabela 3 – Desempenho do sistema

	C. Referência	Crescimento Médio	Crescimento Alto
Garantia mensal (%)	100,0	76,1	56,4
Garantia anual (%)	100,0	72,7	50,0
Duração média de cada falha	0,0	2,6	3,8
Resiliência (%)	100,0	0,0	0,0

A dificuldade de recuperação após uma falha é explicada pelo fato de não existirem falhas com apenas um mês. Mesmo com valor de resiliência de 0% o sistema mostrou-se capaz de fornecer água sem restrições substanciais para o cenário de Médio crescimento, pois apresentou uma restrição média de 38.078 m³/mês para todos os locais de demanda. Durante o horizonte de 22 anos a demanda poderá ser satisfeita em 201 e 149 meses para os cenários de Médio e Alto crescimento, respectivamente. Portanto, são necessárias medidas para antecipar a possível escassez de água no futuro, especialmente para o cenário de crescimento de Alto.

Tabela 4 – Cenários hidrológicos previstos

Ano	C. hidrológico	Ano	C. hidrológico	Ano	C. hidrológico
2019	Muito Seco	2027	Normal	2034	Normal
2020	Seco	2028	Chuvoso	2035	Chuvoso
2021	Normal	2029	Normal	2036	Seco
2022	Chuvoso	2030	Seco	2037	Normal
2023	Normal	2031	Muito Seco	2038	Muito Seco
2024	Seco	2032	Normal	2039	Normal
2025	Normal	2033	Seco	2040	Muito Chuvoso
2026	Muito Seco				

Conclusões

1. O modelo WEAP mostrou a alta dependência da população em águas superficiais que pode tornar-se cada vez menos confiável devido aos impactos do crescimento populacional, do aumento de área de irrigação e da mudança hidrológica.

2. A irrigação será responsável por uso de 57,1% da água na bacia em 2040. O cenário de Alto crescimento demandará mais água, ou seja, uma diferença de 3,3 hm³ em relação ao cenário de Médio crescimento.

3. A escassez de água é esperada a partir de 2028 para o cenário de Alto crescimento e em 2033 para o cenário de Médio crescimento quando a demanda total atinge cerca de 27,0 hm³. A demanda anual não coberta em 2040 é de 3,0 e 6,3 hm³ nos cenários de Médio e Alto crescimento, respectivamente e espera-se que aumente

Série hidrológica prevista

Segundo Asante e Vilankulo (2009), os períodos de precipitação extrema (muito chuvoso), ocorrem com menor frequência, aproximadamente uma vez entre 15 a 20 anos no sul de Moçambique. Para garantir que a seleção de ano aleatório gera condições futuras realistas, toda a série histórica foi incluída na seleção do ano aleatório.

Os cenários hidrológicos assumidos neste trabalho resultam da escolha aleatório das condições hidrológicas observadas nos últimos 31 anos (tabela 4).

continuamente se mantidos os pressupostos destes cenários.

4. Tomando em consideração que estas previsões se basearam em cenários hidrológicos, portanto, as condições hidrológicas futuras podem alterar isso. Estes resultados enfatizam a necessidade de arranjar fontes alternativas (água subterrânea), gestão de perdas de água na rede de distribuição, métodos de rega mais eficientes e conscientização pública sobre o uso dos recursos hídricos.

5. Portanto, estudos futuros devem considerar o emprego de vários modelos em vez de usar um único modelo para conduzir o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq) pelo apoio financeiro (Processo 190215/2017-8 – Chamada CNPq PEC-PG N° 06/2017) e à Universidade Federal de Goiás.

Referências

- Adgolign, T.B.; Rao, G. V. R. S.; Abbulu, Y., 2015. WEAP modeling of surface water Resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* [online] 2. Disponível:// DOI 10.1007/s40899-015-0041-4. Acesso: 19 ago. 2018.
- Arranz, R.; McCartney, M.P. 2007. Application of The Water Evaluation and Planning (WEAP) model to assess future water demand sand resources in the Oliphant Catchment, South Africa. *International Water Management Institute* [online] 116. Disponível:// <http://iwmi.cgiar.org/Publications/Working.../WOR116/> ISBN 978-92-9090-654-4. Acesso: 25 jul. 2018.
- Asante, K.; A. Vilanculo. 2009. Análise da hidrologia e das bacias hidrográficas. INGC. Relatório das Alterações Climáticas. CCG -UCC – Centro de Cambio Global – Universidade Católica de Chile; SEI – Stockholm Environment Institute. 2009. Guia Metodológica –Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos com el Modelo WEAP. Disponível: <http://weap21.org>. acesso: 18 abr. 2018.
- CONSULTEC; SALOMON Lda. 2009. Plano Integrado de Gestão de Recursos Hídricos da Província de Inhambane.
- Dehghanipour, A.H.; Zahabiyoun, B.; Schoups, G.; Babazadeh, H. 2019. A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. *Agricultural Water Management* 223. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105704>. Acesso: 28 mar. 2020.
- Droogers, P.; De Boer, F.; Terink, W. 2014. Water Allocation Models for the Umbeluzi River Basin, Mozambique. *Report Future Water*, 132, 41-69.
- Faiz, M.A.; Liu, D.; Fu, Q.; Li, M.; Baig, F.; Tahir, A.A.; Khan, M.I.; Li, T.; Cui, S. 2018. Performance evaluation of hydrological models using ensemble of General Circulation Models in the northeastern China. *Journal of Hydrology* [online] 565. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.057>.
- Acesso: 18 mar. 2020.
- Guzha, A.C.; Rufino, M.C.; Okoth, S.; Jacobs, S.; Nóbrega, R.L.B. 2018. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology* [online] 15. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>. Acesso: 18 mar.2020.
- Hassan, D.; Bano, R.; Burian, S.J.; Ansari, K. 2017. Modeling water demand and supply for future water resources management. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online] 8. Disponível: <http://http://ijser.org/>. Acesso: 14 abr.2018.
- HIDROPROJECTO. 1998. Estudo Diagnóstico para a Criação da Unidade de Gestão da Bacia do Save, ARA- Sul.
- Hipólito, J.R.; Vaz, A.C. 2017. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 3. ed. Editor IST Press, Lisboa.
- Hussen, B.; Mekonnen, A.; Pingale, S.M. 2018. Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub-basin of Abaya-Chamo, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment* [online] 4. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0438-9>. Acesso: 24 jun.2018.
- INE. Instituto Nacional de Estatística, 2019. Resultados definitivos do censo 2017.
- Johannsen, I. M.; Hengst, J.C.; GoIL, A.; Höllermann, B.; Diekkrüger, B. 2016. Future of Water Supply and Demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under Climate and Land Use Change. *Water* [online] 8. Disponível:<http://doi:10.3390/w8080313>. Acesso: 23 set. 2018.
- Juizo, D.; Liden, R. 2010. Modeling for transboundary Water resources planning and allocation: the case of Southern Africa. *Hydrology na Earth System Sciences* [online] 14. Disponível: <http://doi:10.5194/hess-14-2343-2010>. Acesso: 03 out. 2018.
- Leong, W.K.; Lai, S.H. 2017. Application of Water Evaluation and Planning Model for Integrated Water Resources Management: Case Study of Langat River Basin, Malaysia. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* [online] 210. Disponível: <http://doi:10.1088/1757-899X/210/1/012024>. Acesso: 25 abr. 2018.
- George, O.; Metobwa, M.; Mourad, K.A.; Ribb, E. L. 2018. Water Demand Simulation Using WEAP 21: A Case Study of the Mara River Basin, Kenya. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management* [online] 3.

- Disponível: [http://doi:10.11648/j.ijnrem.20180301.12](http://doi.org/10.11648/j.ijnrem.20180301.12). acesso: 23 jan.2019.
- McCartney, M.P.; Yawson, D.; Magagula, T.F.; Seshoka, J. 2004. Hydrology and water resources development in the Olifants river catchment. International Water Management Institute [online] 76. Disponível: <http://iwmi.cgiar.org/Publications/Working.../WOR116/ISBN978-92-9090-654-4>. 15 set. 2018.
- Omar, M.E.D.M.; Moussa, A.M.A. 2016. Water management in Egypt for facing the future challenges. Journal of Advanced Research [online] 7. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2016.02.005>. Acesso: 26.nov. 2018.
- Purkey, D.; Galbraith, H.; Huber-Lee, A.; Sieber, J.; Yates, D. 2009. WEAP21—A Demand-, Priority- and Preference-Driven Water Planning Model. Water Int. 30, 501–512.
- SEI - Stockholm Environment Institute. 2015. User Guide – WEAP. [online]. Disponível: <http://weap21.org>. Acesso: 11 abr. 2018.
- SEI - Stockholm Environment Institute. 2016. WEAP- TUTORIAL Water Evaluation and Planning System. In WEAP; Stockholm Environment Institute. [online]. Disponível: <http://weap21.org>. Acesso: 25 abr. 2018.
- Simões, J.; Oliveira, R. 2014. Modelos de gestão de bacias hidrográficas: o desempenho dos modelos IRAS-2010 e AQUATOOL na simulação do aproveitamento hidroagrícola do Vale do Sorraia. APRH [online] 35 (2). Disponível: <http://DOI10.5894/rh35n2-3>. Acesso: 13 ago. 2018.
- Miraji, M.; Liu, J.; Zheng, C. 2019. The Impacts of Water Demand and Its Implications for Future Surface Water Resource Management: The Case of Tanzania's Wami Ruvu Basin (WRB). Water [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w11061280>. Acesso: 16 mar. 2020.
- Rodell, M.; Famiglietti, J.S.; Wiese, D.N.; Reager, J.T.; Beaudoin, H.K. 2018. Emerging trends in global freshwater availability. Nature [online] 557, 651–659.
- Suryadi, Y.; Chrysanti, A.; Nurnadiati, F.; Adityawan, M.B.; Kuntoro, A.A. 2018. Study on Water Resources Allocation for Kertajati, Jatitujuh, and Ligung Sub-Districts to Support the Development of West Java International Airport (BIJB) and Kertajati Aerocity Area. MATEC Web of Conferences [online] 147. Disponível: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814703010>. acesso: 17 mar.2020.
- SWECO; Associates. Estudo conjunto da bacia do Rio Umbeluzi. NDF197. 2005. Primeiro projeto nacional de desenvolvimento do setor de águas.
- UNESCAP (United Nations, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific), 2000. Principles and Practices of Water Allocation among Water-Use Sectors. ESCAP Water Resources Series No. 80, Bangkok Thailand.
- Yates, D.; Sieber, J.; Purkey, D.; Lee, A. 2005. WEAP21 -A demand, priority, and preference-driven water planning model-part 1: model characteristics. Water International [online] 30 (4). Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/02508060508691893>. Acesso: 22 mai. 2018.
- Zeinali, M.; Azari, A.; Heidari, M.M. 2020. Simulating Unsaturated Zone of Soil for Estimating the Recharge Rate and Flow Exchange Between a River and an Aquifer. Water Resources Management [online] 34. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02458-7>. Acesso: 4 abr. 2020.
- Zuffo, A.C.; Zuffo, M.S.R. 2016. Gerenciamento de Recursos Hídricos: conceituação e contextualização. 1. ed. Editora Elsevier, Rio de Janeiro.