





# Projeções de vazão para avaliação de estimativa de carga de nutrientes afluentes à lagoa Mangueira, Rio Grande do Sul, em cenários de mudanças climáticas do Quinto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas

*Projections of flow to assess nutrient inputs to the Mangueira lake, Rio Grande do Sul, on climate change scenarios of the Fifth Assessment Report of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change*

Nathalia Mendes Felizzola<sup>1</sup>, Leonardo Facini Fernandes<sup>1</sup>, Juan Martin Bravo<sup>1\*</sup> ,  
Daniela Sanagiotto<sup>1</sup> , Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues<sup>1</sup> ,  
David Manuel Leinho da Motta Marques<sup>1</sup> 

## RESUMO

As mudanças climáticas podem causar alterações drásticas nos ecossistemas lacustres especialmente em razão da elevação da temperatura e das alterações na precipitação, provocando, entre outros fatores, aumento no aporte de nutrientes e, conseqüentemente, eutrofização. Este trabalho apresenta a estimativa de projeções de vazão e carga de nutrientes ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) afluentes à lagoa Mangueira – grande lagoa rasa subtropical localizada no extremo sul do Brasil. As projeções foram baseadas nos produtos do Quinto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas (AR5), no *Representative Concentration Pathway* – RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5. Em cada cenário, foram utilizados produtos de até 39 modelos climáticos globais para a estimativa das projeções das variáveis em dois períodos futuros de 30 anos, centrados em 2030 (próximo) e 2070 (longo). Os resultados mostram como situação mais provável o aumento das vazões, com maior concordância entre os produtos do AR5, quando comparados aos do Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas (AR4) estimados em trabalho anterior. Nas projeções de cargas de nutrientes também prevalece o padrão de aumento. Os nutrientes analisados apresentam elevação de carga média anual de 9,34% no futuro próximo e no RCP 2.6, enquanto no futuro longo e no RCP 8.5 esse valor se eleva para 22,48%. Medidas mitigadoras deverão ser previstas com o objetivo de reduzir a carga de nutrientes afluentes e manter o bom estado ecológico da lagoa.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas; projeções de vazão; projeções de carga de nutrientes.

## ABSTRACT

Climate change can cause drastic changes in lake ecosystems, especially due to the increase in temperature and changes in precipitation, promoting, among other factors, an increase in the nutrients input and, therefore, eutrophication. This paper estimated the projected flow and nutrients load ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) at the Mangueira lake – a large subtropical shallow lake, located in southern Brazil. The projections were based on the AR5 products for RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios. In each scenario, data from as many as 39 global climate models were used to estimate the projected values of flow and nutrients in two 30-year time intervals centered at 2,030 (near future) and 2,070 (long future). Results show the increase in flow is more likely, with a greater agreement between AR5 products when compared to AR4 products estimated in previous work. The pattern of increase also prevails in the projections of nutrient loads. The nutrients analyzed show an average annual load increase of 9,34% in the near future and RCP 2.6 scenario, while in the long future and RCP 8.5 scenario, this value rises to 22.48%. Mitigation measures should be studied to reduce the nutrient inputs and to preserve a good ecological status of the lake.

**Keywords:** climate change; flow projections; nutrient load projections.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre (RS), Brasil.

\*Autor correspondente: jumabra@iph.ufrgs.br

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul.

**Recebido:** 20/07/2021 – **Aceito:** 20/05/2022 – Reg. ABES: 20210194

## INTRODUÇÃO

As projeções da temperatura da superfície terrestre mostram aumento no valor dessa variável ao longo do século XXI em todos os cenários de emissões avaliados, e, com isso, as mudanças climáticas podem aumentar os riscos existentes ou criar novos riscos para os sistemas naturais e humanos (IPCC, 2014). As projeções mostram, além do aumento da temperatura, significativa elevação da população mundial, graças às baixas taxas de mortalidade e à alta expectativa de vida (GERLAND *et al.*, 2014).

Uma das ameaças mais sérias aos ecossistemas naturais são as mudanças climáticas, por suas implicações para a estrutura, funcionamento e serviços ecossistêmicos fornecido por lagos (ROSENZWEIG *et al.*, 2007; HAVENS; JEPPESEN, 2018). Lagos são particularmente vulneráveis às mudanças climáticas em razão de seu relativo isolamento e sua fragmentação física em grandes paisagens terrestres (WOODWARD; PERKINS; BROWN, 2010). Pelo menos um dos fatores que efetivamente será acarretado pelas mudanças climáticas, o aquecimento da água dos lagos, é conhecido por ter efeitos sinérgicos com o enriquecimento de nutrientes (HAVENS; JEPPESEN, 2018).

As alterações do clima e do uso do solo na bacia hidrográfica de contribuem ao lago também podem provocar o aumento das cargas de nutrientes afluentes. Em bacias agrícolas, mudanças na precipitação e decomposição de matéria orgânica podem alterar principalmente a importação de nutrientes para corpos d'água (ADRIAN *et al.*, 2009; JEPPESEN *et al.*, 2011). As cargas de nutrientes são modificadas não apenas pela precipitação, mas também pelo aumento populacional, demandando maior quantidade de alimentos, que levará a modificações no uso do solo e no gerenciamento na agricultura, incluindo as mudanças nas culturas escolhidas, na rotação de culturas etc. (OLESEN *et al.*, 2007).

Como consequência do enriquecimento de nutrientes nos lagos, há a potencial ocorrência de eutrofização, quando ocorrem *blooms* de crescimento de microalgas e cianobactérias (FEUCHTMAYR *et al.*, 2009), o das últimas estando entre os eventos mais citados (HAVENS *et al.*, 2016; RICHARDSON *et al.*, 2019).

O aumento da concentração do fitoplâncton com a ocorrência de *blooms* tende a reduzir a transparência da água (WOODWARD; PERKINS; BROWN, 2010), limitando a chegada da radiação do sol às camadas mais profundas do lago. Associado a isso, durante os períodos de seca, o aumento do tempo de residência e das cargas de nutrientes é esperado e favorece a ocorrência de cianobactérias potencialmente tóxicas (MOSS *et al.*, 2011; NEWCOMBE *et al.*, 2012).

Ainda, mudanças na química da água são esperadas. Conforme sobem a temperatura e os nutrientes em um lago, verifica-se redução do oxigênio dissolvido disponível no corpo hídrico (JENSEN; ANDERSEN, 1992), o que resulta em mudanças dramáticas para todas as comunidades aquáticas, mas especialmente nos peixes pela alta demanda de oxigênio requerida por seu metabolismo (JEPPESEN *et al.*, 2010). Os efeitos diretos do aumento da temperatura e da carga de nutrientes também estão interligados com as teias alimentares, cuja estrutura e funcionamento são influenciados pela dinâmica do clima (MOSS *et al.*, 2003).

Dessa forma, as mudanças climáticas podem provocar o enriquecimento de nutrientes em lagos pelo próprio aumento da temperatura da água, bem como pelo aumento da carga de nutrientes desde a bacia. Neste último caso, a elevação das cargas de nutrientes pode ser provocada pelo aumento da precipitação, gerando maiores cargas pelo aumento das vazões e/ou pela alteração do uso do solo, passando-se a usos do solo com potencial de gerar maiores concentrações de nutrientes.

Tentativas de prever os possíveis efeitos de mudanças climáticas globais em ambientes aquáticos envolveram experimentação (DAVIS *et al.*, 2009; FEUCHTMAYR *et al.*, 2009; WIELICZKO *et al.*, 2020) e uso de modelagem (DOMIS; MOOIJ; HUISMAN, 2007; ELLIOTT; DEFIEW, 2011; BRÉDA *et al.*, 2020). Nesse contexto, esta pesquisa contribui para a análise das alterações das vazões e cargas de nutrientes afluentes a lagos, como consequência da alteração no padrão de precipitação na bacia provocada por mudanças climáticas. Com o intuito de avaliar quais os potenciais impactos das alterações climáticas, utilizam-se projeções de variáveis do clima, as quais são geradas por Modelos Climáticos Globais (MCG). Trabalhos prévios (i.e. HAGEDORN; DOBLAS-REYES; PALMER, 2005; REICHLER; KIM, 2008; SEMENOV; STRATONOVITCH, 2010) demonstram que é preferível utilizar conjuntos de modelos, visto que estes enfatizam a incerteza nas previsões climáticas resultantes de diferenças estruturais dos MCG. O conjunto de MCG (*Coupled Model Intercomparison Project 5* — CMIP5) utilizado no Quinto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas (AR5 — IPCC, 2013) melhorou a representação das principais características da precipitação no período chuvoso e do sistema monção da América do Sul (ALVES; MARENGO, 2010; CHOU *et al.*, 2012; BOISIER *et al.*, 2015) quando comparado a seus antecessores, permitindo uma estimativa mais confiável das mudanças projetadas na precipitação para a maior parte de América do Sul.

Os MCG têm sido utilizados ao longo dos anos para fornecer dados de entrada a modelos hidrológicos. Estes permitem melhor compreensão dos processos e proveem amplas oportunidades de análise dos mecanismos de resposta das bacias hidrográficas às variações do clima. As projeções geradas pelo conjunto de MCG são utilizadas para alimentar os modelos hidrológicos de forma a serem calculadas variáveis de interesse a lagos, como as vazões e cargas afluentes. Recentes estudos na América do Sul (e.g., TASSI *et al.*, 2013; BRAVO *et al.*, 2014; SORRIBAS *et al.*, 2016; TEJADAS *et al.*, 2016; BRÉDA *et al.*, 2020) têm utilizado projeções de variáveis climáticas geradas por modelos climáticos globais como dados de entrada a modelos hidrológicos para verificar o impacto nas principais variáveis hidrológicas.

Em função do apresentado, a contribuição da pesquisa está associada à estimativa preliminar e à análise das projeções de vazão e carga de nutrientes considerados agentes eutrofizantes — nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) — afluentes à Lagoa Mangueira (RS), baseadas em projeções de mudanças climáticas. As projeções de vazões e cargas de nutrientes foram geradas com base em projeções de um conjunto de MCG com até 39 membros e em três cenários de emissão de gases que provocam o efeito estufa: *Representative Concentration Pathway* —RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5.

## ÁREA DE ESTUDO

Formado por lagoas interconectadas e banhados, o Sistema Hidrológico do Taim (SHT) representa um conjunto de ecossistemas aquáticos de água doce e possui, associada ao sistema, uma Unidade de Conservação Federal — a Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim) — que tem a função de preservar o patrimônio ecológico existente. A conservação do sistema é conectada com o uso do recurso da água, sendo a principal atividade econômica da região o cultivo de arroz, o qual utiliza a água do sistema para a irrigação.

O SHT encontra-se entre o oceano Atlântico e a lagoa Mirim, ao sul do Estado do Rio Grande do Sul, abrangendo partes dos municípios de Santa Vitória do Palmar e de Rio Grande (Figura 1). Esse sistema é composto de três

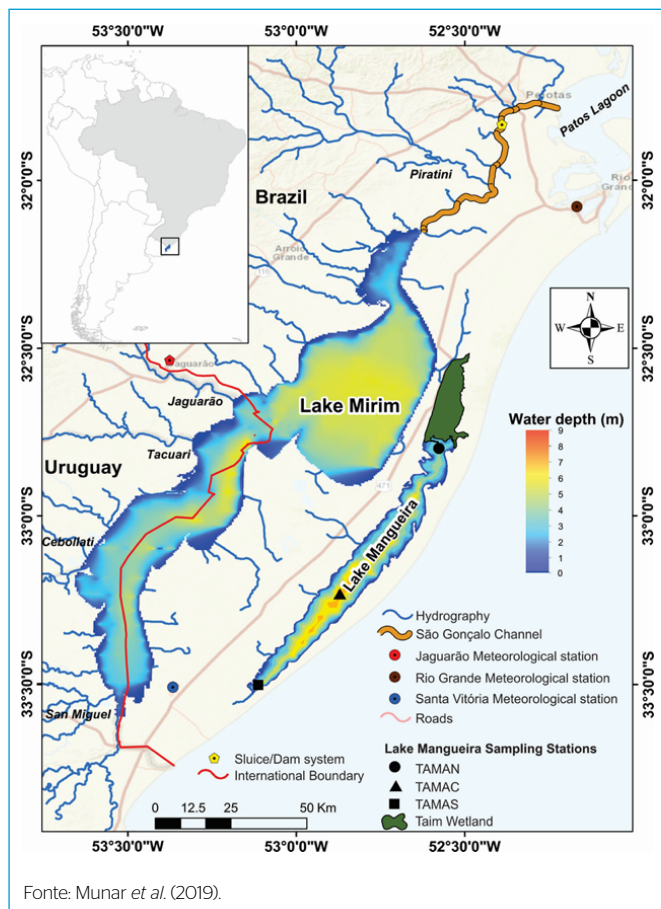


Figura 1 - Localização do Sistema Hidrológico do Taim e da lagoa Manguueira.

subsistemas distintos: Subsistema Norte (integrado pela lagoa Caiubá, pela lagoa das Flores e pelo banhado do Maçarico); Subsistema do Banhado (integrado pelo banhado do Taim e pelas lagoas Nicola e Jacaré); e Subsistema Sul (formado pela lagoa Manguueira e sua bacia de contribuição) (MARQUES *et al.*, 2013).

A Lagoa Manguueira é uma grande lagoa rasa, que possui extensão de 90 km por 10 km de largura em seu ponto mais largo (alongado na direção Norte-Sul), área superficial de aproximadamente 820 km<sup>2</sup> e profundidade média aproximada de 2,6 m e máxima de 6,9 m (TAVARES *et al.*, 2019). Toda a água dessa lagoa é proveniente da chuva que incide diretamente sobre sua superfície e do escoamento gerado pela bacia hidrográfica de contribuição, e as perdas de água ocorrem principalmente por evaporação e bombeamento para a irrigação de arroz.

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, sendo o município de Santa Vitória do Palmar, onde a lagoa Manguueira está inserida, um dos principais produtores do Estado (RIO GRANDE DO SUL, 2021). Na região do sistema hidrológico do Taim, os interesses da orizicultura — principal atividade econômica da região — e de conservação do ecossistema têm gerado conflitos pelo uso da água. Em uma grande área a oeste da lagoa Manguueira, de aproximadamente 40.000 ha, é cultivado arroz por irrigação. A manutenção da alta produtividade dessa cultura requer a permanência de uma lâmina d'água sobre o plantio por um período de aproximadamente 90 dias (MARQUES *et al.*, 2002). No verão, quando o nível da lagoa Manguueira tende a diminuir em função dos baixos índices de precipitação sazonal e das altas taxas de bombeamento (VILLANUEVA;

MARQUES; TUCCI, 2000), altas concentrações de fosfato e nitrato são encontradas em virtude do rebaixamento do nível da água e do aporte de cargas de efluentes provenientes dos campos de arroz, provocando mudanças na estrutura trófica e na transparência da água na lagoa (HAMESTER; PETRY; MARQUES, 2005).

O clima da região em que o SHT se encontra é do tipo subtropical úmido (ou temperado), sendo o período de inverno considerado moderadamente frio e chuvoso e o de verão caracterizado por ser quente e seco. A precipitação média anual é aproximadamente igual a 1.200 mm, e a temperatura média anual no local é de 18°C, sendo janeiro o mês mais quente, com temperatura média de 22,8°C, e julho o mês mais frio, com temperatura média de 12,8°C.

## METODOLOGIA

A metodologia utilizada para estimar as projeções de vazões ( $Q_{proj}$ ) e de cargas de nutrientes ( $NO_3^{-3Proj}$  e  $PO_4^{-3Proj}$ ) afluentes à lagoa Manguueira, em cenários de mudanças climáticas, é apresentada na Figura 2. Foram empregados dados de projeções de mudanças climáticas de precipitação, um modelo hidrológico previamente ajustado para a bacia analisada e dados de aportes de nutrientes estimados em trabalho prévio. As projeções de vazões e cargas de nutrientes foram estimadas com intervalo de tempo diário, em dois períodos futuros de 30 anos: próximo (centrado em 2030) e longo (centrado em 2070). A metodologia adotada é descrita em detalhes nos itens apresentados a seguir.

## ESTIMATIVA DAS PROJEÇÕES DE PRECIPITAÇÃO

Foram utilizadas projeções de precipitação em três cenários de emissão de gases que provocam o efeito estufa, utilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas no Quinto Relatório de Avaliação das mudanças climáticas (AR5 — IPCC, 2014). Os três cenários considerados foram:

- RCP 2.6, o qual representa um cenário de mitigação rigorosa;
- RCP 4.5, o qual corresponde a cenários intermediários;
- RCP 8.5, o qual se caracteriza pela alta taxa de emissão de gases de efeito estufa.

Em cada cenário de emissão, foi utilizado um conjunto de MCG. Existem alguns modelos que melhor representam a climatologia do local, e outros que são considerados não tão adequados para caracterizar a região de estudo. Não obstante, previsões de longo prazo obtidas apenas pelos modelos que melhor representam a climatologia local não têm sido tão eficazes quanto aquelas obtidas por meio de um conjunto maior de modelos, que engloba tanto os mais vantajosos quanto os mais desfavoráveis (HAGEDORN; DOBLAS-REYES; PALMER, 2005; REICHLER; KIM, 2008; UR RAHMAN *et al.*, 2018).

Em vista disso, neste trabalho foram utilizados dados de até 39 MCG (Tabela 1), com o intuito de obter um conjunto de resultados pelos quais possam ser calculadas medidas de tendência central e de dispersão. Estimativas de projeções mensais das variáveis climatológicas conforme cenários de mudanças climáticas foram disponibilizadas em bancos de dados do AR5 (IPCC, 2014) e obtidas do Centro Alemão de Cálculo Climático (*Deutsches Klimarechenzentrum* — DKRZ) para toda a América do Sul.

No cenário RCP 2.6 foram utilizados dados de 28 modelos. No RCP 4.5 foram usados dados de 39 modelos e, no RCP 8.5, de 38 modelos. Essa diferença

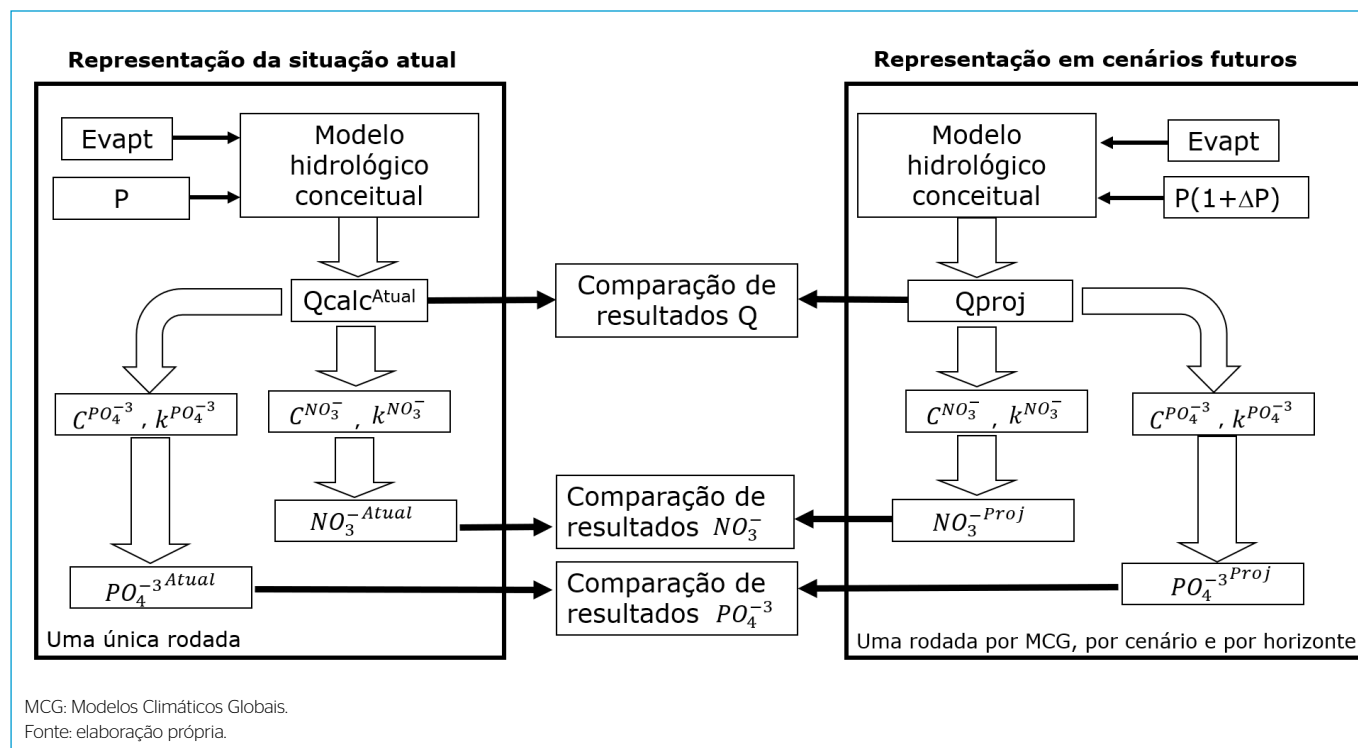


Figura 2 - Representação esquemática da metodologia utilizada.

Tabela 1 - Modelos climáticos globais utilizados para a estimativa das projeções de carga dos nutrientes

Modelos Climáticos	País	Modelos Climáticos	País	Modelos Climáticos	País
ACCESSIO	Austrália	CSIRO-MK	Austrália	HadGEM-ES	Reino Unido
ACCESSI3	Austrália	EC-EARTH	Holanda / Irlanda	INM-CM4	Rússia
BCC-CSM1	China	FGOALS	China	IPSL-CM5A-LR	França
BCC-CSMM	China	FIO-ESM	China	IPSL-CM5A-MR	França
BNU-ESM	China	GFDL-CM3	Estados Unidos	IPSL-CM5B-MR	França
CAN-ESM2	Canadá	GFDL-M2G	Estados Unidos	MIROC5	Japão
CCSM4	Estados Unidos	GFDL-M2M	Estados Unidos	MIROC-ESM	Japão
CSM1-BGC	Estados Unidos	GISS-E2H	Estados Unidos	MIROC-HEM	Japão
CESM1-CA	Estados Unidos	GIS-E2HC	Estados Unidos	MPIESMLR	Alemanha
CESM1-WA	Estados Unidos	GISS-E2R	Estados Unidos	MPI-ESM-MR	Alemanha
CMCC-CM	Itália	GISS-E2RC	Estados Unidos	MRI-CGCM3	Japão
CMCC-CMS	Itália	HadGEM-AO	Reino Unido	NorESM1-M	Noruega
CNRM-CM5	França	HadGEM2-C	Reino Unido	NorESM-ME	Noruega

Fonte: elaboração própria.

no número de modelos entre os cenários decorreu da indisponibilidade de todos os modelos no banco de dados recebido.

Como as projeções de precipitação estimadas pelos MCG apresentam erros, foi utilizado o método *delta change* (GELLENS; ROULIN, 1998) para a remoção de viés e a obtenção das projeções corrigidas de precipitação. Inicialmente foram estimados os valores médios mensais de precipitação em cada mês do ano, no período atual e no período futuro de cada MCG, em cada cenário. Na sequência, foi estimada a projeção de anomalia percentual da precipitação mensal de cada mês do ano (vetor  $\Delta P$  com 12 valores), para cada MCG, em cada cenário e futuro. Por fim, as projeções de anomalias de cada mês do ano foram utilizadas

para perturbar os dados observados de precipitação diária no correspondente mês do ano, no período de 1º de janeiro de 1960 a 31 de dezembro de 1990, obtendo-se as projeções de precipitação diária utilizadas para alimentar o modelo hidrológico.

### Estimativa de concentrações dos nutrientes

As concentrações dos nutrientes foram medidas durante o período de produção do arroz, quando há a drenagem das lavouras, fornecendo dados de monitoramento de uma extensa campanha realizada durante um ano no período de cultivo agrícola (2005) em um campo representativo de arroz (FRAGOSO

JR. *et al.*, 2011). Desse modo, foi observado por Fragoso Jr. *et al.* (2011) que as concentrações dos nutrientes possuíam um ápice ( $C_0$ , concentração inicial) imediatamente após os campos serem inundados no mês de outubro ou após as mudas jovens serem estabelecidas, sendo o início do período de cultivo o mês de novembro. A partir desse período, as concentrações dos nutrientes decaíam exponencialmente até o início do próximo período de cultivo, no ano seguinte, quando um novo ciclo começava. Coeficientes de decaimento exponencial ( $k$ ) foram formulados (Tabela 2) com o intuito de representar a variabilidade intra-anual para cada nutriente (FRAGOSO JR. *et al.*, 2011). Supôs-se que os mesmos padrões sazonais de concentração de nutrientes tivessem ocorrido em todas as áreas da bacia hidrográfica da lagoa, dada a uniformidade no uso do solo e no tipo de solos existentes.

Com o objetivo de estimar as concentrações dos nutrientes de cada dia no período de 1º de janeiro de 1960 a 31 de dezembro de 1990, considerado o período atual, aplicou-se a Equação 1, sendo  $C$  a concentração estimada no dia,  $C_0$  a concentração inicial e  $k$  o coeficiente de decaimento. O dia zero, no qual foi utilizada a concentração inicial (e consequentemente máxima), foi estipulado em 15 de novembro em razão do início do período de cultivo de arroz.

$$C = C_0 \cdot e^{(-k \cdot \text{dia})} \quad (1)$$

Dessa forma, não foi considerada a variação interanual das concentrações, que seriam resultado de alterações nos procedimentos de preparo dos solos e plantio, da operação do próprio sistema e da frequência e carga de fertilizantes utilizados. Assim, consideramos que ao longo dos 30 anos do período atual e dos períodos futuros as concentrações dos nutrientes ao longo do ano seriam aquelas estimadas mais recentemente. Isso representa uma simplificação, mas que permitiu isolar o efeito do clima na estimativa das cargas de nutrientes, conforme apresentado na sequência.

### Estimativa de projeções de vazão

A metodologia utilizada na estimativa das projeções de vazão de afluência à lagoa Mangureira foi a mesma utilizada por Tejadas *et al.* (2016) e brevemente apresentada a seguir. Ressaltamos que, no presente trabalho, são utilizados dados do AR5, enquanto Tejadas *et al.* (2016) se apoiaram em dados do AR4.

O modelo hidrológico IPH II (TUCCI; SANCHEZ; LOPES, 1981a; TUCCI; SANCHEZ; LOPES, 1981b; GUTIERREZ; ADAMATTI; BRAVO, 2019) foi empregado neste trabalho com os valores dos parâmetros previamente ajustados à bacia de contribuição da lagoa Mangureira por Fragoso Jr. (2009). Como não existem dados de vazão observada na bacia, os parâmetros foram estimados em função do desempenho de um modelo hidrodinâmico em representar os níveis da água observados na lagoa Mangureira, quando alimentado com as vazões afluentes definidas pelo modelo IPH II, precipitação direta e evaporação sobre a lagoa, considerando ainda as retiradas de água para irrigação. Dado que o balanço de volume da água na lagoa foi corretamente representado pelo modelo

hidrodinâmico, entendeu-se que as entradas e saídas de água também foram bem representadas (FRAGOSO JR., 2009).

As vazões de contribuição à lagoa Mangureira no período atual foram estimadas por meio de uma única rodada do modelo IPH II (Figura 2). Nessa rodada, o modelo foi alimentado com a série temporal diária de precipitação observada no período de 1º de janeiro de 1960 a 31 de dezembro de 1990 e as normais climatológicas de evapotranspiração potencial. Posteriormente, as projeções de precipitação diária (definidas na sequência) foram utilizadas para alimentar o modelo IPH II, mantendo-se os restantes dados de entrada iguais aos da situação atual e gerando as projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangureira nos períodos futuros.

### Estimativa de projeções de carga dos nutrientes

A estimativa de carga de nutrientes foi feita pelo produto entre as vazões (no período atual e nos períodos futuros) e concentrações (período atual) do respectivo nutriente. Assim, as cargas estimadas no período atual correspondem a práticas agrícolas mais recentes, considerando-se que o clima atual (1960–1990) tenha acontecido, bem como que as cargas estimadas no período futuro correspondam também ao uso das práticas agrícolas mais recentes, mas levando-se em conta o clima do futuro. Dessa forma foi isolado o efeito apenas do clima no aporte de cargas de nutrientes à lagoa Mangureira, em cenários de mudanças climáticas.

Na estimativa das cargas diárias de nutrientes no período atual foram utilizadas as vazões diárias estimadas para o clima atual e as concentrações diárias de cada nutriente estimadas no período atual. Por sua vez, na estimativa de projeções diárias de carga de nutrientes em cenários de mudanças climáticas, foram usadas as projeções de vazões diárias estimadas na etapa anterior e as concentrações diárias de cada nutriente estimadas no período atual.

No cálculo das cargas futuras, considerando-se um dado cenário (i.e. Cen-1) e período futuro (i.e. Fut-1), os seguintes cálculos foram executados:

- cálculo das cargas diárias no período de 30 anos, totalizando 10.957 dias para cada modelo do conjunto no Cen-1 e Fut-1, para cada nutriente;
- cálculo das cargas mensais (360 meses) e anuais (30 anos) para cada modelo do conjunto no Cen-1 e Fut-1;
- cálculo de medidas estatísticas de tendência central (mediana) e dispersão (percentis 10 e 90) baseado nas cargas do conjunto de modelos no Cen-1 e Fut-1.

Com essa metodologia, foram estimados 151.200 valores de projeções de carga mensal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

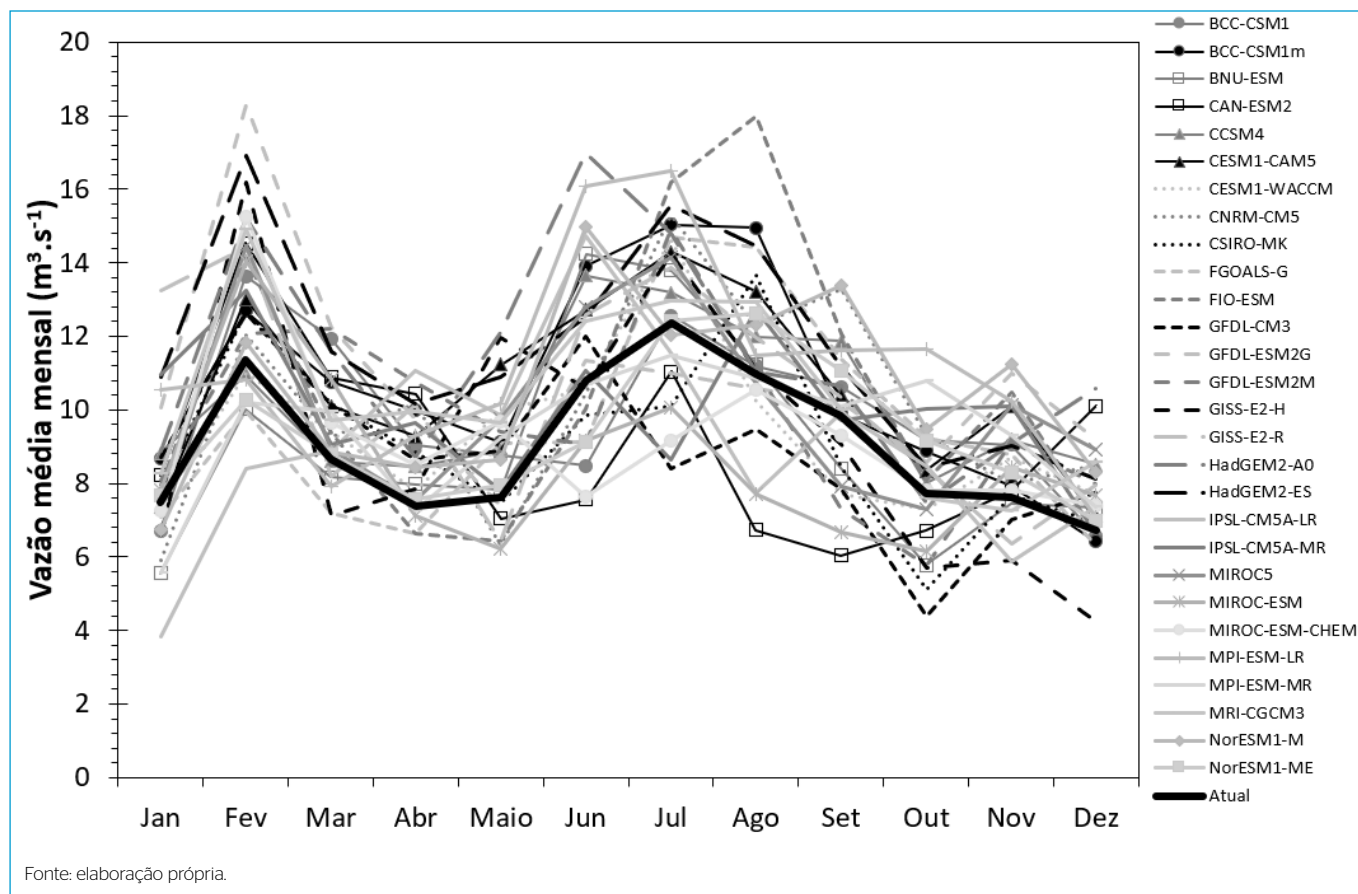
### Projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangureira

Ao se analisarem as vazões mensais no período atual, foi verificada a presença de picos nos meses de fevereiro e julho (Figura 3). As projeções de vazão da maioria dos modelos, nos diferentes cenários e futuros, retratam picos similares nesses meses ou nos meses próximos e valores menores nos restantes, como por exemplo o apresentado nos resultados do RCP 2.6 no futuro longo (Figura 3). Como também observado na Figura 3, em termos gerais, os resultados mostram grandes diferenças projetadas, predominando as projeções de incremento de vazão mensal, mas com grande dispersão entre os resultados dos conjuntos de MCG.

**Tabela 2** - Valores de concentrações iniciais ( $C_0$ ) e dos coeficientes de decaimento exponencial ( $k$ ) dos nutrientes.

	$k$ (dia <sup>-1</sup> )	$C_0$ (mg L <sup>-1</sup> )
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0,0097	0,264
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,0120	0,145

Fonte: Fragoso Jr. *et al.* (2011).



**Figura 3** - Vazões médias mensais de contribuição à lagoa Mangueira em cada mês do ano, no período atual, e no cenário RCP 2.6 e futuro próximo para o conjunto de Modelos Climáticos Globais.

A análise dos resultados de cada MCG mostra, em todos os cenários e horizontes, percentual superior a 80% dos MCG do conjunto apontando o aumento das vazões médias anuais (Figura 4). O percentual da alteração da vazão média anual considerando todos os MCG, cenários e períodos futuros apresenta uma faixa de variação de -8,4 a +57%, estando a maioria dos valores na faixa de 0 a +30%.

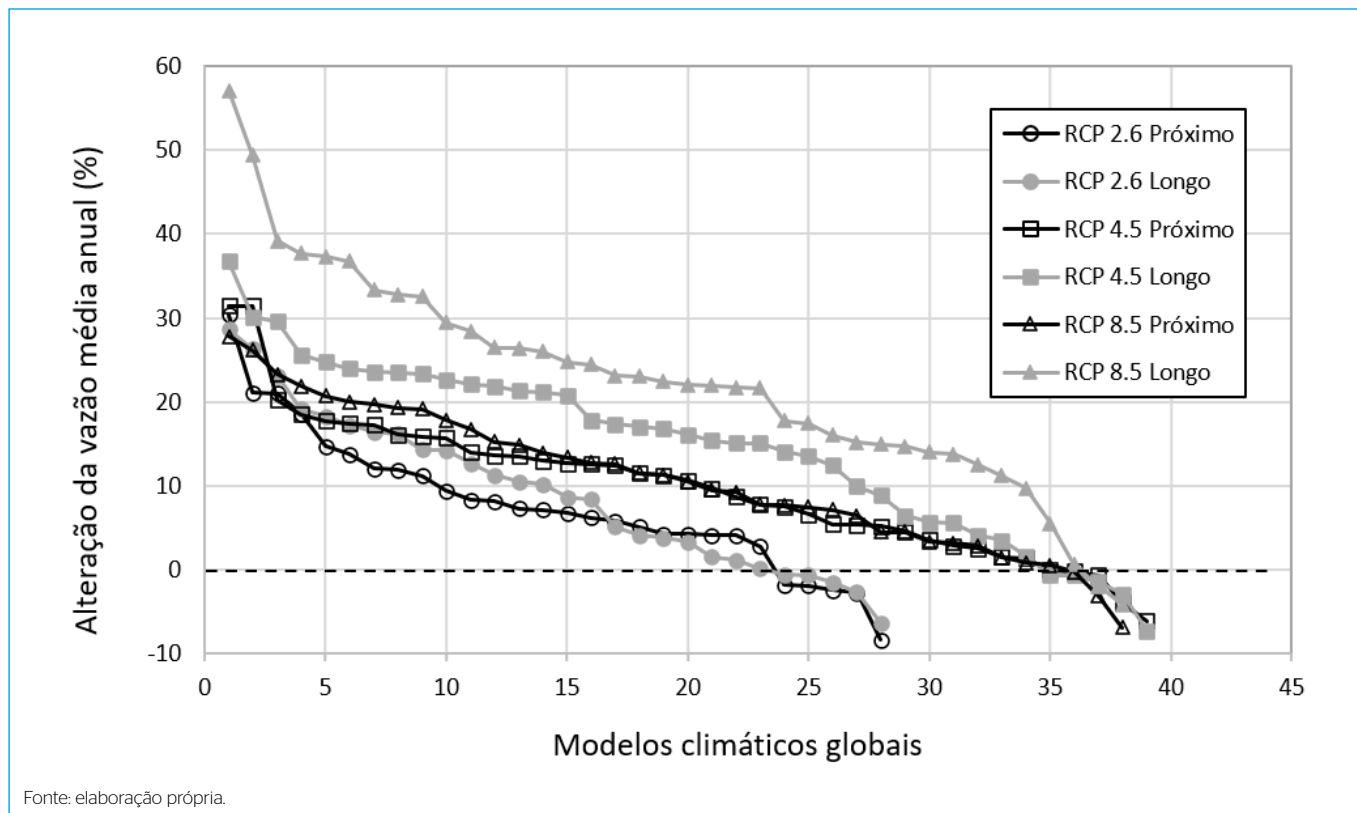
Uma comparação entre as vazões médias mensais no período atual e as estatísticas das projeções de vazão do conjunto de MCG é apresentada na Figura 5, considerando-se os três cenários e os dois períodos futuros. Observa-se, nessa figura, que a mediana das projeções de vazão do conjunto de MCG é maior que o valor de vazão atual em todos os meses do ano, em todos os cenários e períodos analisados. Vê-se também que o aumento no valor da mediana das vazões mensais projetadas é superior no futuro longo (Figuras 5B, 5D e 5F), para o qual apresenta valores médios iguais a +0,84, +1,36 e +1,97 m<sup>3</sup>/s nos cenários RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente, em comparação ao futuro próximo (Figuras 5A, 5C e 5E) do respectivo cenário, em que tem valores médios iguais a +0,61, +0,76 e +0,94 m<sup>3</sup>/s nos cenários RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Resultados similares quanto a projeções de aumento das vazões estimadas em cenários de mudanças climáticas do AR5 foram apresentados por outros trabalhos desenvolvidos na região de estudo (e.g. RIBEIRO NETO *et al.*, 2016; SCHUSTER; FAN; COLLISCHONN, 2020), embora com menor número de MCG (dois e 20, respectivamente).

As medidas de dispersão dos resultados dos MCG, em termos de percentil 10% e percentil 90% das vazões projetadas pelo conjunto de MCG, apresentaram

valores muito próximos nos três cenários no futuro próximo (Figuras 2A, 2C e 2E). No entanto, enquanto no cenário RCP2.6 os valores dos percentis continuam similares no futuro próximo e no futuro longo (Figuras 2A e 2B), nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 essas estatísticas mostram dispersão maior dos resultados no horizonte longo, com maiores destaques no cenário RCP 8.5.

As projeções de vazões nos cenários do AR5 desta pesquisa foram também analisadas em comparação das projeções de vazão afluente à lagoa Mangueira realizadas em trabalhos anteriores. Tejadadas *et al.* (2016) estimaram projeções de vazões com 20 MCG, nos mesmos dois períodos futuros utilizados neste trabalho, considerando dois cenários (A2 e B2) baseados nos produtos gerados pelo AR4 do Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC). O cenário A2 do AR4 idealiza um futuro em que existem altas emissões de gases que provocam o efeito estufa, ao passo que o cenário B2 considera baixas emissões.

Enquanto nos resultados que utilizaram produtos do AR4 se observou que a mediana das vazões do conjunto de MCG apresentou valores maiores às vazões atuais em apenas seis meses do ano, nos diferentes cenários e horizontes analisados (TEJADAS *et al.*, 2016), nos resultados que utilizaram produtos do AR5 observamos todos os meses apresentando mediana superior às vazões atuais, nos diferentes cenários e horizontes. Além disso, a dispersão dos resultados é menor com os produtos do AR5, com menores amplitudes na diferença Percentil10–Percentil90, quando comparados aos resultados do AR4, sendo mais notória quando comparados os cenários mais pessimistas, como A2 e RCP 8.5. Além disso, existe maior concordância no sinal da alteração esperada nas diferentes



**Figura 4** – Alteração da vazão média anual de contribuição à lagoa Mangureira (em %) nos diferentes cenários e períodos futuros analisados, considerando-se os diferentes conjuntos de Modelos Climáticos Globais.

projeções, com maior número de modelos concordando com o aumento das vazões no AR5 (23 de 28 MCG no RCP 2.6; 34 de 39 MCG no RCP 4.5; e 35 de 38 MCG no RCP 8.5, comparados a 12 de 20 MCG no AR4). Resultados como este, em que produtos do AR5 apresentam maior concordância quando comparados a produtos do AR4, foram também observados em outras regiões da América do Sul (BRÊDA *et al.*, 2020).

Outro ponto de destaque quanto à comparação de resultados com o uso de produtos do AR4 e do AR5 foi a análise das vazões projetadas no período de novembro a fevereiro, correspondente à maior produção de cargas de nutrientes em decorrência da agricultura, na bacia hidrográfica de contribuição à lagoa Mangureira. Nos meses de novembro, dezembro e janeiro, quando utilizados produtos do AR4, a mediana do conjunto de MCG nos cenários A2 e B2 apresentados por Tejadas *et al.* (2016) mostrou diminuição das vazões e pequeno aumento no mês de fevereiro. Nos resultados deste trabalho, com os produtos do AR5, a mediana do conjunto de modelos em todos os cenários e futuros analisados mostra aumento da vazão nos quatro meses. Em termos percentuais, o valor médio da mediana do conjunto foi 6,12 a 10,14% superior no período futuro próximo e 11,2 a 17,82% superior no período futuro longo, considerando-se os diferentes cenários.

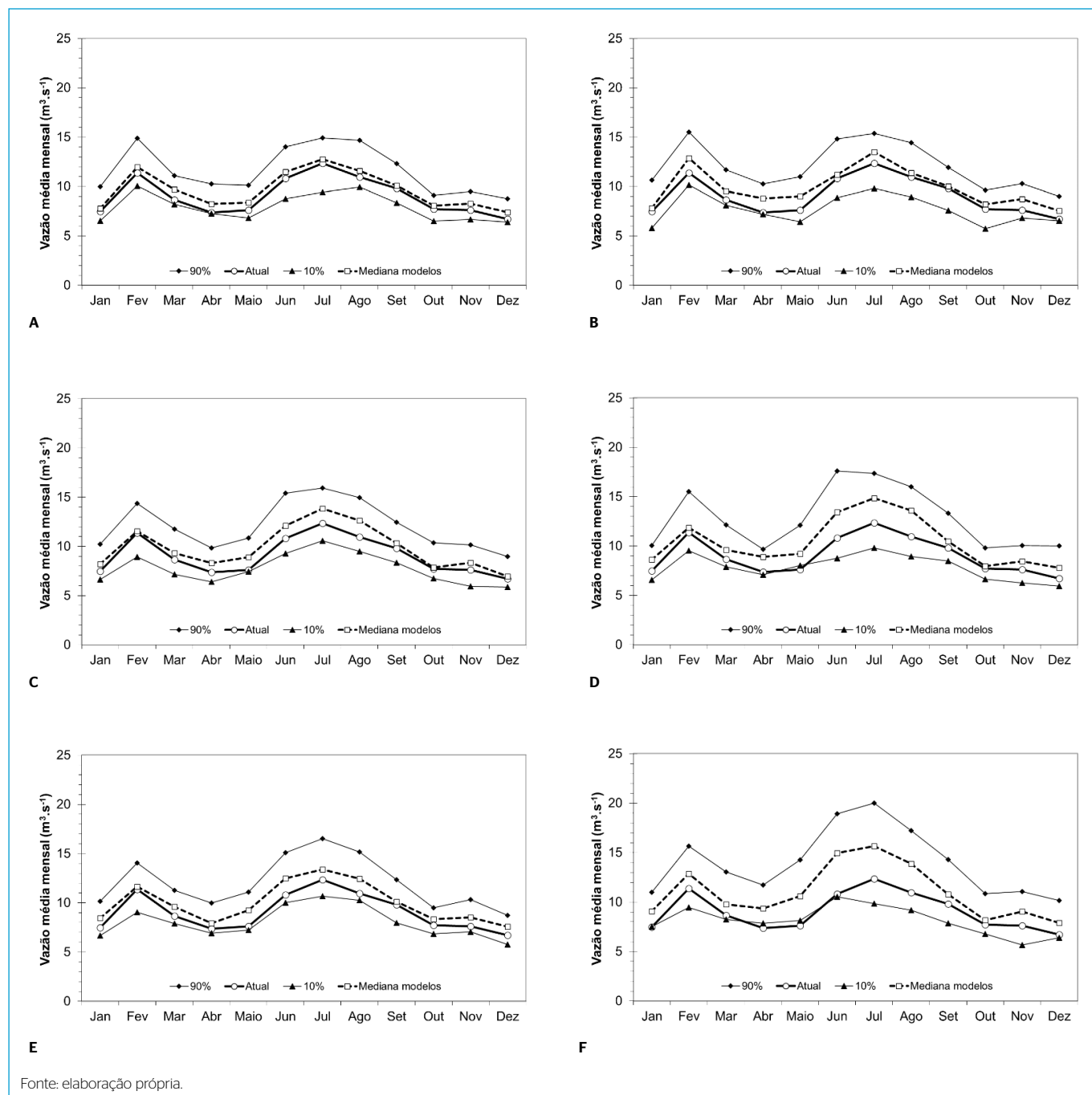
Posteriormente à realização do presente trabalho, produtos do Sexto Relatório de Avaliação das mudanças climáticas (AR6 — IPCC, 2021) foram disponibilizados. Existem diferenças nos cenários de mudanças climáticas e nos períodos de base e futuros quando comparados os resultados do AR5 e do AR6. No entanto, observou-se nos resultados apresentados por Almazroui *et al.* (2021) e IPCC (2021) que a região onde a bacia hidrográfica da lagoa Mangureira está

inserida manteve alto grau de concordância quanto ao aumento da precipitação e escoamento projetado pelos MCG (> 66% dos modelos concordando) no AR6. Além disso, como observado nos resultados do AR5 na região, no AR6 períodos futuros mais distantes e cenários mais pessimistas apresentaram projeções de aumento de precipitação e escoamento com maiores magnitudes.

### Projeções de carga dos nutrientes afluente à lagoa Mangureira

Após estimadas as projeções de vazão para cada MCG, em cada cenário e horizonte, esses dados foram utilizados, com as concentrações atuais dos nutrientes, para a estimativa de projeções de carga afluente à lagoa Mangureira. Em todos os casos avaliados, os meses de setembro e outubro são os que apresentam a menor concentração dos nutrientes, haja vista que o cultivo de arroz se inicia no mês de novembro, no qual foi considerada a concentração inicial e máxima dos nutrientes. Nos meses posteriores, sucede um decaimento exponencial das concentrações até o início do próximo período de cultivo, em novembro do ano seguinte. Em vista disso, nos meses de setembro e outubro a quantidade dos nutrientes se mostra muito inferior à do resto do ano. Essa dinâmica de nutrientes também foi observada no estudo de Rodrigues, Marques e Fontoura (2015), que identificaram maior concentração de nutrientes (Fósforo total — TP e Nitrogênio total — TN) durante a primavera e o verão — coincidindo com o período de início do cultivo de arroz na região.

De forma geral, ao se avaliar a carga média mensal dos nutrientes analisados  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ , observa-se um claro padrão de aumento, que revela, dessa forma, a possível degradação da qualidade da água na lagoa Mangureira nos



Fonte: elaboração própria.

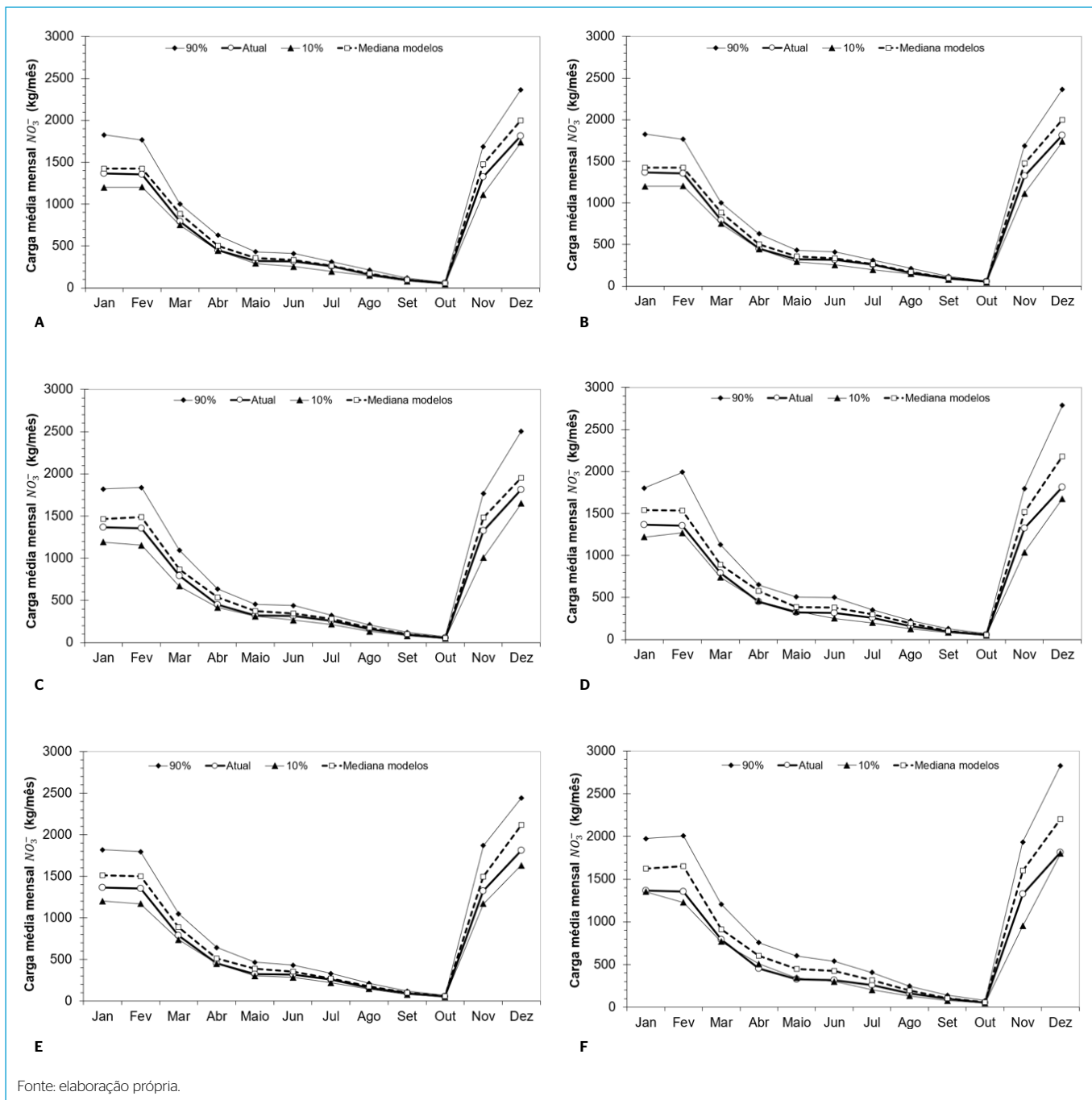
**Figura 5** – Estatísticas das projeções de vazão do conjunto de Modelos Climáticos Globais: (A e B) mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de modelos RCP 2.6, (C e D) RCP 4.5 e (E e F) RCP 8.5, para o (A, C e E) horizonte próximo e o (B, D e F) horizonte longo.

horizontes futuros, em todos os cenários analisados (Figuras 6 e 7). As alterações previstas nas cargas dos nutrientes são consequências apenas da variação das vazões projetadas, visto que neste trabalho não foram estimados valores futuros das concentrações dos nutrientes. Por esse motivo, os resultados de cargas projetadas dos nutrientes analisados seguem um padrão similar, apenas variando em termos absolutos, quando comparados os resultados apresentados na Figura 6 ( $\text{NO}_3^-$ ) e na Figura 7 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Os padrões poderiam ser diferentes se consideradas outras tecnologias/procedimentos nas práticas agrícolas ou a

alteração no uso e gestão do solo na bacia hidrográfica de contribuição à lagoa Mangueira, pois esses são fatores que podem contribuir para a modificação das concentrações dos nutrientes em cenários futuros.

As medianas das projeções de cargas mensais do conjunto de MCG apresentam valores muito próximos aos da carga atual nos meses de junho a outubro (Figuras 6 e 7). Entretanto, nos meses de novembro a maio as medianas do conjunto de MCG demonstram valores maiores aos atuais, com maiores incrementos no horizonte longo, em todos os cenários. A análise dos





**Figura 6** – Estatísticas da carga média mensal atual e projetada do  $\text{NO}_3^-$  nos cenários (A e B) RCP 2.6, (C e D) RCP 4.5 e (E e F) RCP 8.5, para o (A, C e E) horizonte próximo e o (B, D e F) horizonte longo: mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de Modelos Climáticos Globais.

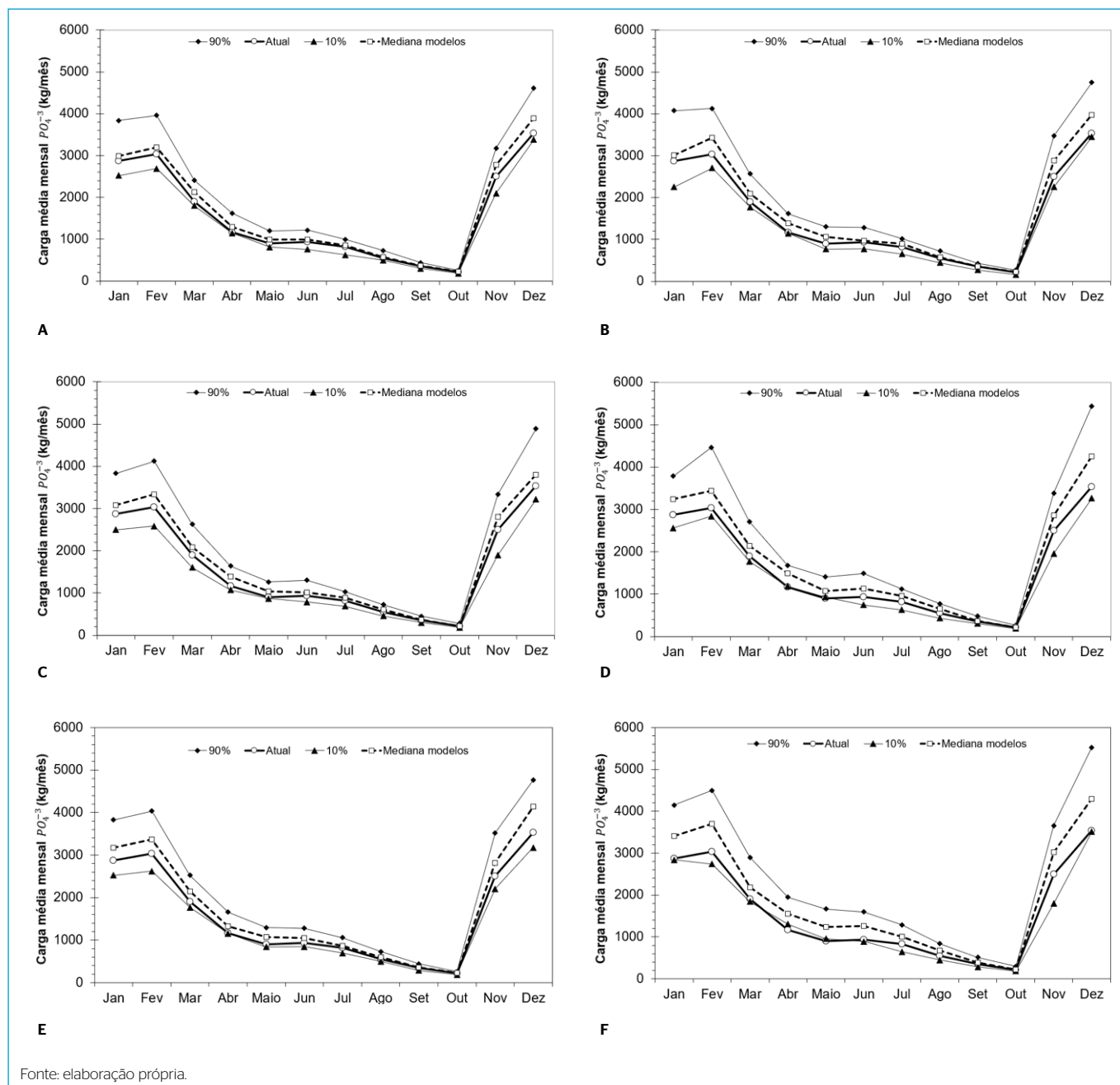
resultados de cada MCG aponta incremento no valor das cargas em praticamente todos os meses do ano. Em todos os cenários, no horizonte próximo, 88,7% dos MCG apresentam acréscimo na carga média mensal, enquanto no horizonte longo, para os cenários 4.5 e 8.5, esse número amplia-se para 91 e 92,75%, respectivamente.

Os resultados obtidos mostram que no horizonte longo e no cenário RCP 8.5 foram estimados os maiores valores de carga projetada, seguido pelo cenário intermediário (RCP 4.5) e pelo cenário de menores emissões de gases do

efeito estufa (RCP 2.6). Diferentemente, no horizonte próximo, as projeções de carga de nutrientes apresentam resultados similares.

Em todos os cenários e horizontes, nota-se que as medianas de carga média mensal projetadas pelos MCG (Figuras 6 e 7) apresentam valores superiores aos do período atual, com os maiores aumentos no período de novembro a fevereiro.

Os valores médios das projeções de anomalias do conjunto de MCG foram estimados também em escala anual, em que foram obtidas as porcentagens de alteração das cargas médias anuais projetadas para os dois nutrientes, nos três



**Figura 7** - Estatísticas da carga média mensal atual e projetada do  $PO_4^{3-}$  nos cenários (A e B) RCP 2.6, (C e D) RCP 4.5 e (E e F) RCP 8.5, para o (A, C e E) horizonte próximo e o (B, D e F) horizonte longo: mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de Modelos Climáticos Globais.

cenários e nos dois horizontes analisados. Em todos os cenários e horizontes, houve incremento das cargas médias anuais, com maiores valores no horizonte longo. Entre os cenários, os maiores incrementos foram observados no cenário RCP 8.5, seguido pelos cenários RCP 4.5 e RCP 2.6. À vista disso, a maior diferença entre os resultados é observada entre o cenário RCP 2.6, no horizonte próximo — no qual foi projetado aumento na carga anual de 9,34% — e o cenário RCP 8.5 no horizonte longo, no qual esse aumento se eleva para 22,48%. O cenário RCP 4.5 apresentou valores intermediários em ambos os horizontes, resultando igual a incremento de 10,6 e 16,25% nos horizontes próximo e longo, respectivamente.

Estudos prévios realizados em ecossistemas lacustres (e.g. JEPPESEN *et al.*, 2011) apontam resultados similares aos desta pesquisa, com incrementos de cargas de certos nutrientes em cenários futuros de mudanças climáticas. Jeppesen *et al.* (2011) estimaram cargas de  $NO_3^-$  e de  $NH_4^+$  afluentes a um rio de clima temperado, no período 2071–2100 e no cenário A2, utilizando dois diferentes modelos, e obtiveram como resultados aumentos de 7 e 12,1% na carga média anual de nitrogênio.

Outros trabalhos (i.e. ROBERTSON *et al.*, 2016; YASARER *et al.*, 2017; LUO *et al.*, 2020) também estimaram cargas futuras de nutrientes em cenários de mudanças climáticas, indicando resultados similares aos do presente estudo.

Luo *et al.* (2020) utilizaram apenas um modelo climático do CMIP5 e verificaram, nos cenários RCP2.6 e RCP8.5, acréscimo na carga de  $\text{NO}_3^-$  entre 11,7 e 32,6% e, na carga de amônia, entre 3,1 e 26,9%, em futuro próximo, em um rio na China. Mais dois outros estudos analisaram as cargas futuras de nutrientes afluentes a rios localizados nos Estados Unidos. Yasarer *et al.* (2017) adotaram conjuntos de 15 MCG para o cenário RCP8.5 (período de 2040–2070) e obtiveram incrementos de 9,6 e 9,2% para as cargas de nitrogênio e fósforo, respectivamente. Já Robertson *et al.* (2016) empregaram modelos climáticos do AR4, obtendo aumento de 10 a 25% na carga do fósforo para o cenário A2.

Os resultados deste trabalho mostram, como situação futura mais provável, o aumento das cargas afluentes à lagoa Mangueira em virtude das mudanças climáticas, independentemente do cenário e horizonte, quando apenas as alterações do clima são consideradas. O acréscimo anual de nutrientes na lagoa propiciará um ambiente muito favorável para o desenvolvimento de microalgas e cianobactérias, potencializando, dessa forma, a ocorrência de florações. Em vista disso, a lagoa poderá sofrer alterações que comprometerão a qualidade da água, o que acabará influenciando as comunidades aquáticas e diversos serviços ecossistêmicos. Algumas alternativas de mitigação em cenários de mudanças climáticas que apresentam aumento de cargas de nutrientes são: alteração nas práticas agrícolas para reduzir a perda de nutrientes na drenagem de águas superficiais por meio da aplicação dos fertilizantes, conforme a capacidade determinada de retenção do solo e as necessidades de cultivo; redução mais eficaz do carregamento de nutrientes de fontes pontuais por água de esgoto; redução do escoamento de nutrientes provenientes das águas pluviais; estabelecimento de vegetação ribeirinha para transferências de nutrientes para massas de água; maior controle de introdução, dispersão e estabelecimento de espécies exóticas; e aplicação de meandros para aumentar a retenção, decomposição e perda de matéria orgânica e nutrientes (JEPPÉSEN *et al.*, 2010).

## CONCLUSÃO

Projeções de vazão afluente e cargas foram estimadas para cenários de mudanças climáticas do AR5, na região da lagoa Mangueira, localizada no sul do Rio Grande do Sul.

Comparando-se os resultados de vazão projetada entre produtos do AR4 (TEJADAS *et al.*, 2016) e do AR5, observou-se que os últimos apresentam maior concordância, com mais de 80% dos modelos apontando o aumento das

vazões em todos os cenários e horizontes analisados. Também foi percebido que, no período mais importante da geração de cargas de nutrientes na bacia hidrográfica (novembro a fevereiro), os produtos do AR4 mostravam diminuição das vazões em novembro, dezembro e janeiro, e pequeno aumento no mês de fevereiro. No entanto, os produtos do AR5 mostraram aumento das vazões em todos esses meses.

Na perspectiva dos cenários de mudanças climáticas considerados, diante do incremento das precipitações e das vazões, poderá ocorrer aumento das cargas de nutrientes afluentes à lagoa Mangueira. Em todos os cenários foi verificado maior aumento das cargas no horizonte longo do que no próximo. No cenário que apresenta as maiores emissões de gases do efeito estufa (RCP 8.5), foram obtidos os maiores aumentos de carga, seguido pelo cenário intermediário (RCP 4.5) e, por último, pelo cenário que propõe mitigação rigorosa (RCP 2.6), indicando os menores e mais otimistas aumentos de cargas dos nutrientes. Visando manter um bom estado ecológico dos lagos, a carga crítica de nutrientes deve ser reduzida em condições de climas mais quentes no futuro (JEPPÉSEN *et al.*, 2009).

Por fim, em trabalhos futuros devem ser analisados cenários de modificação do uso do solo e das práticas agrícolas conforme a descrição do cenário de mudanças climáticas, permitindo uma avaliação mais abrangente da modificação do aporte de cargas de nutrientes à lagoa Mangueira, considerando-se as alterações nas concentrações futuras dos nutrientes. Além disso, podem ser estimadas projeções de vazão e carga de nutrientes baseadas nos novos produtos e cenários do AR6 (IPCC, 2021).

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Felizzola, N. M.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Software, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação. Fernandes, L. F.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Software, Validação, Visualização. Bravo, J. M.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Metodologia, Software, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Sanagiotto, D. G.: Conceituação, Metodologia, Validação, Escrita – Revisão e Edição. Rodrigues, L. H. R.: Conceituação, Metodologia, Validação, Escrita – Revisão e Edição. Marques, D. M. L. M.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Metodologia, Validação, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R.; REILLY, C.M.O.; ZAGARESE, H.; BAINES, S.B.; DAG, O.; KELLER, W.; LIVINGSTONE, D.M.; SOMMARUGA, R.; STRAILE, D. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, v. 54, n. 6, p. 2283-2297, 2009. [https://doi.org/10.4319%2Flo.2009.54.6\\_part\\_2.2283](https://doi.org/10.4319%2Flo.2009.54.6_part_2.2283)
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; ABID, M.A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M.S.; SÖRENSSON, A.A.; ARIAS, P.A.; ALVES, L.M.; TIPPETT, M.K.; SAEED, S.; HAARSM, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J.A.; EHSAN, M.A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, A.G.; ALI, A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M.B. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth System and Environment*, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- ALVES, L.M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 100, p. 337-350, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0165-2>

- BOISIER, J.P.; CIAIS, P.; DUCHARNE, A.; GUIMBERTEAU, M. Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nature Climate Change*, v. 5, p. 656-660, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2658>
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A.R.; ALLASIA, D.G.P.; DOMEQ, F. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. *Climatic Change*, v. 127, n. 1, p. 27-41, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0816-2>
- BRÉDA, J.P.L.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHON, W.; BRAVO, J.M.; SIQUEIRA, V.A.; STEINKE, E.B. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>
- CHOU, S.C.; MARENGO, J.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635-653, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8>
- DAVIS, T.W.; BERRY, D.L.; BOYER, G.L.; GOBLER, C.J. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms. *Harmful Alga*, v. 8, n. 5, p. 715-725, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2009.02.004>
- DOMIS, L.S.; MOOIJ, W.M.; HUISMAN, J. Climate-induced shifts in an experimental phytoplankton community: a mechanistic approach. *Hydrobiologia*, v. 584, n. 1, p. 403-413, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-0609-6>
- ELLIOTT, J.A.; DEFEW, L. Modelling the response of phytoplankton in a shallow lake (Loch Leven, UK) to changes in lake retention time and water temperature. *Hydrobiologia*, v. 681, n. 1, p. 105-116, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0930-y>
- FEUCHTMAYR, H.; MORAN, R.; HATTON, K.; CONNOR, L.; HEYES, T.; MOSS, B.; HARVEY, I. Global warming and eutrophication: effects on water chemistry and autotrophic communities in experimental hypertrophic shallow lake mesocosms. *Journal of Applied Ecology*, v. 46, n. 3, p. 713-723, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01644.x>
- FRAGOSO JR., C.R. *Modelagem tridimensional da estrutura trófica em ecossistemas aquáticos continentais rasos*. 199f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- FRAGOSO JR., C.R.; MARQUES, D.M.L.M.; FERREIRA, T.F.; JANSE, J.H.; NES, E.H. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. *Environmental Modelling & Software*, v. 26, n. 11, p. 1337-1348, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.004>
- GELLENS, D.; ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 210, n. 1-4, p. 242-258, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00192-9)
- GERLAND, P.; RAFTERY, A.E.; SEVCIKOVA, H.; LI, N.; GU, D.; SPOORENBERG, T.; ALKEMA, L.; FOSDICK, B.K.; CHUNN, J.; LALIC, N.; BAY, G.; BUETTNER, T.; HEILIG, G.K.; WILMOTH, J. World population stabilization unlikely this century. *Science*, v. 346, n. 6206, p. 234-237, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1257469>
- GUTIERREZ, J.C.T.; ADAMATTI, D.S.; BRAVO, J.M. A new stopping criterion for multi-objective evolutionary algorithms: application in the calibration of a hydrologic model. *Computational Geosciences*, v. 23, n. 2, p. 1219-1235, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10596-019-09870-3>
- HAGEDORN, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; PALMER, T.N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting—I. Basic concept. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, v. 57, n. 3, p. 219-233, 2005. <https://doi.org/10.3402/tellusav57i3.14657>
- HAMESTER, A.; PETRY, A.T.; MARQUES, D.M.L.M. Efeito potencial do gradiente trófico em cascata de reservatórios na formação de trihalometanos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. *Anais...* 2005.
- HAVENS, K.E.; FULTON, R.S.; BEAVER, J.R.; SAMPLES, E.E.; COLEE, J. Effects of climate variability on cladoceran zooplankton and cyanobacteria in a shallow subtropical lake. *Journal of Plankton Research*, v. 38, n. 3, p. 418-430, 2016. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbw009>
- HAVENS, K.E.; JEPPESEN, E. Ecological responses of lakes to climate change. *Water*, v. 10, n. 7, p. 917, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10070917>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON 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. Cambridge, Reino Unido e Nova York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra, 2014. 151 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra, 2021. 3949 p.
- JENSEN, H.S.; ANDERSEN, F.O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography*, v. 37, n. 3, p. 577-589, 1992. <https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.3.0577>
- JEPPESEN, E.; KRONVANG, B.; MEERHOFF, M.; SONDERGAARD, M.; HANSEN, K.M.; ANDERSEN, H.E.; LAURIDSEN, T.L.; LIBORIUSSEN, L.; BEKLIOGLU, M.; OZEN, A.; OLESEN, J.E. Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality*, v. 38, n. 5, p. 1930-1941, 2009. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0113>
- JEPPESEN, E.; KRONVANG, B.; OLESEN, J.E.; AUDET, J.; SONDERGAARD, M.; HOFFMANN, C.C.; ANDERSEN, H.E.; LAURIDSEN, T.L.; LIBORIUSSEN, L.; LARSEN, S.E.; BEKLIOGLU, M.M.; OZEN, A.; OZKAN, K. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia*, v. 663, n. 1, p. 1-21, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0547-6>
- JEPPESEN, E.; MEERHOFF, M.; HOLMGREN, K.; GONZÁLEZ-BERGONZONI, I.; MELLO, F.T.; DECLERCK, S.A.J.; MEESTER, L.; SØNDERGAARD, M.; LAURIDSEN, T.L.; BJERRING, R.; CONDE-PORCUNA, J.M.; MAZZEO, N.; IGLESIAS, C.; REIZENSTEIN, M.; MALMQUIST, H.J.; LIU, Z.; BALAYLA, D.; LAZZARO, X. Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia*, v. 646, n. 1, p. 73-90, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0171-5>

- LUO, C.; LI, Z.; LIU, H.; LI, H.; WAN, R.; PAN, J.; CHEN, X. Differences in the responses of flow and nutrient load to isolated and coupled future climate and land use changes. *Journal of Environmental Management*, v. 256, 109918, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109918>
- MARQUES, D.M.L.M.; RODRIGUES, L.H.R.; FRAGOSO, C.R.; CROSSETTI, L.O.; CARDOSO, L.S.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; THEY, N.G.H.; BEMVENUTI, M.A.; GARCIA, A.; VIEIRA, J.P.; CANTERLE, E.R.B.; CARDOSO, M.A.G.; BECKER, V.; PAULO, V.G.; BRAVO, J.M.; SOUZA, R.S.; RIBEIRO, C.V.; CALLEGARO, V.L.M.; SILVA, S.A.; WERNER, V.R.; ROSA, Z.M.; VILLANUEVA, A.; MORESCO, A.; CONDINI, M.V.L.; BURNS, M.D.; WURDIG, N.L. O sistema hidrológico do Taim. In: TABARELLI, M.; ROCHA, C.F.D.; ROMANOWSKI, H.P.; ROCHA, O.; LACERDA, L.D. (org.). *PELD-CNPq: dez anos do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração do Brasil: achados, lições e perspectivas*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2013. p. 200-224.
- MARQUES, D.M.L.M.; TUCCI, C.E.M.; CALAZANS, D.; CALLAGARO, V.L.M.; VILLANUEVA, A.O. O Sistema hidrológico do Taim - Site 7. In: SEELIGER, U.; CORDAZZO, C.; BARBOSA, F. (org.). Os sites e o programa brasileiro de pesquisa ecológica de longa duração. Belo Horizonte: [s.n.], 2002. p. 125-144.
- MOSS, B.; KOSTEN, S.; MEERHOFF, M.; BATTARBEE, R.W.; JEPPESEN, E.; MAZZEO, N.; HAVENS, K.; LACEROT, G.; LIU, Z.; MEESTER, L.; PAERL, H.; SCHEFFER, M. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, v. 1, n. 2, p. 101-105, 2011.
- MOSS, B.; MCKEE, D.; ATKINSON, D.; COLLINGS, S.E.; EATON, J.W.; GILL, A.B.; HARVEY, I.; HATTON, K.; HEYES, T.; WILSON, D. How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. *Journal of Applied Ecology*, v. 40, n. 5, p. 782-792, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00839x>
- MUNAR, A.M.; CAVALCANTI, J.R.; BRAVO, J.M.; MARQUES, D.M.L.M.; FRAGOSO JR., C.R. Assessing the large-scale variation of heat budget in poorly gauged watershed-shallow lake system using a novel integrated modeling approach. *Journal of Hydrology*, v. 575, p. 244-256, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.025>
- NEWCORBE, G.; CHORUS, I.; FALCONER, I.; LIN, T. Cyanobacteria: Impacts of climate change on occurrence, toxicity and water quality management. *Water Research*, v. 46, n. 5, p. 1347-1348, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.047>
- OLESEN, J.E.; CARTER, T.R.; DÍAZ-AMBRONA, C.H.; FRONZEK, S.; HEIDMANN, T.; HICKLER, T.; HOLT, T. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Climatic Change*, v. 81, p. 123-143, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9216-1>
- REICHLER, T.; KIM, J. How well do coupled models simulate today's climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 89, n. 3, p. 303-312, 2008. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-303>
- RIBEIRO NETO, A.; PAZ, A.R.; MARENGO, J.; CHOU, S. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, n. 12, p. 1103-1127, 2016. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>
- RICHARDSON, J.A.; FEUCHTMAYR, H.; MILLER, C.; HUNTER, P.; MABERLY, S.C.; CARVALHO, L. The response of cyanobacteria and phytoplankton abundance to warming, extreme rainfall events and nutrient enrichment. *Global Change Biology*, v. 25, n. 10, p. 3365-3380, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14701>
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental. *Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul*. 6. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, Departamento de Planejamento Governamental, 2021. 203 p.
- ROBERTSON, D.M.; SAAD, D.A.; CHRISTIANSEN, D.E.; LORENZ, D.J. Simulated impacts of climate change on phosphorus loading to Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research*, v. 42, n. 3, p. 536-548, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.03.009>
- RODRIGUES, L.R.; MARQUES, D.M.L.M.; FONTOURA, N.F. Fish community in a large coastal subtropical lake: How an environmental gradient may affect the structure of trophic guilds. *Limnetica*, v. 34, n. 2, p. 495-506, 2015. <https://doi.org/10.23818/limn.34.37>
- ROSENZWEIG, C.; CASASSA, G.; KAROLY, D.J.; IMESON, A.; LIU, C.; MENZEL, A.; RAWLINS, S.; ROOT, T.L.; SEGUIN, B.; TRYJANOWSKI, P. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: PARRY, M.L.; CANZIANI, O.F.; PALUTIKOF, J.P.; VAN DER LINDER, P.J.; HANSON, C.E. (org.). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Reino Unido: Cambridge University Press, 2007. p. 79-131.
- SCHUSTER, R.C.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon's Basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, e9, p. 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190061>
- SEMENOV, M.A.; STRATONOVITCH, P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, v. 41, n. 1, p. 1-14, 2010. <https://doi.org/10.3354/cr00836>
- SORRIBAS, M.V.; PAIVA, R.C.D.; MELACK, J.; BRAVO, J.M.; JONES, C.; CARVALHO, L.; BEIGHLEY, E.; FORSBERG, B.; COSTA, M.H. Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, v. 136, p. 555-570, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>
- TASSI, R.; BRAVO, J.M.; VILLANUEVA, A.; MARQUES, D.M.L.M.; ALLASIA, D.G.P.; TASSINARI, L. Climate changes and their major impacts on environmental conditions of a freshwater Brazilian wetland. *IAHS-AISH Publication*, v. 359, p. 333-339, 2013.
- TAVARES, M.; CUNHA, A.; MARQUES, D.M.L.M.; RUHOFF, A.; CAVALCANTI, J.; FRAGOSO, C.R.; BRAVO, J.M.; MUNAR, A.M.; FAN, F.M.; RODRIGUES, L.H.R. Comparison of methods to estimate lake-surface-water temperature using landsat 7 ETM+ and MODIS imagery: case study of a large shallow subtropical lake in Southern Brazil. *Water*, v. 11, n. 1, p. 168-189, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11010168>
- TEJADAS, B.E.; BRAVO, J.M.; SANAGIOTTO, D.G.; TASSI, R.; MARQUES, D.M.L.M. Projeções de vazão afluente à lagoa Mangueira com base em cenários de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 3, p. 262-272, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150139>
- TUCCI, C.E.M.; SANCHEZ, J.E.O.; LOPES, M.O.S. Modelo IPH-II de simulação precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza. Fortaleza: ABRH, 1981a. Anais 2, p. 83-103.
- TUCCI, C.E.M.; SANCHEZ, J.E.O.; LOPES, M.O.S. Modelo matemático precipitação vazão IPH II. *Cadernos de Recursos Hídricos*, Publicação 3. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 1981b. 64 p.

UR RAHMAN, M.H.; AHMAD, A.; WANG, X.; WAJID, A.; JATOI, W.; HUSSAIN, M.; AHMAD, B.; AHMAD, I.; ALI, Z.; ISHAQUE, W.; AWAIS, M.; MUDDASIR, M.; SHELIA, V.; AHMAD, S.; FAHAD, S.; ALAM, M.; ULLAH, H.; HOOGENBOOM, G.; et al. Multi-model projections of future climate and climate change impacts uncertainty assessment for cotton production in Pakistan. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 253-254, p. 94-113, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.008>

VILLANUEVA, A.O.; MARQUES, D.M.L.M.; TUCCI, C.E.M. The Taim wetland conflict: a compromise between environment conservation and irrigation. *Water International*, v. 25, n. 4, p. 610-616, 2000. <https://doi.org/10.1080/02508060008686876>

WIELICZKO, A.R.; RODRIGUES, L.R.; MOTTA-MARQUES, D.; CROSSETTI, L.O. Phytoplankton structure is more influenced by nutrient enrichment

than by temperature increase: An experimental approach upon the global changes in a shallow subtropical lake. *Limnetica*, v. 39, n. 1, p. 405-418, 2020. <https://doi.org/10.23818/limn.39.26>

WOODWARD, G.; PERKINS, D.M.; BROWN, L.E. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 365, n. 1549, p. 2093-2106, 2010. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0055>

YASARER, L.M.W.; BINGNER, R.L.; GARBRECHT, J.D.; LOCKE, M.A.; LIZOTTE, R.E.; MOMM, H.G.; BUSTEED, P.R. Climate change impacts on runoff, sediment, and nutrient loads in an agricultural watershed in the lower Mississippi River Basin. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 33, n. 3, p. 379-392, 2017. <https://doi.org/10.13031/aea.12047>

