

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DE PREVISÃO CLIMÁTICA SAZONAL INTEGRADA A MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA VAZÃO E DO ESTADO TRÓFICO EM UMA SEÇÃO ESTRATÉGICA DO RIO JAGUARIBE (CEARÁ-BRASIL)

*Maria de Jesus Delmiro Rocha¹; Jefferson Hannover Faustino Magalhães²; Jonatha
Marcelino de Lima³; Cleiton da Silva Silveira⁴; Iran Eduardo Lima Neto⁵ & Ticiana Marinho de
Carvalho Studart⁶*

Palavras chave: modelagem atmosférica; modelagem hidrológica; qualidade da água;

INTRODUÇÃO

A aplicação de previsões climáticas para forçar um modelo hidrológico a simular componentes do ciclo hidrológico, como a geração de vazão para uma estação adiante mostra-se como uma ferramenta de gestão potencial. Os métodos empregados para obter essas previsões têm melhorado continuamente (Merryfield *et al.* 2013) e a disponibilidade de uma grande quantidade de modelos através do *North American Multimodel Ensemble* (NMME) permite a aplicação destes para a combinação de modelagem atmosférica e hidrológica, fornecendo assim, uma representação física dos processos hidroclimáticos de uma bacia hidrográfica (Cabral, Campos e Silveira, 2017).

A utilização da previsão de vazão contínua de curto prazo pode ser empregada para atividades estratégicas como irrigação e abastecimento de água, dependendo, entretanto, das características do sistema e do ambiente de decisão. No nordeste brasileiro, em particular no Ceará, a elevada variabilidade no regime de precipitações (Costa e Silva, 2017) aliada a complexidade no gerenciamento de uma rede de reservatórios para o sistema de abastecimento de água favorece a aplicação desse tipo de previsão como ferramenta de auxílio gerencial. Dentre a diversidade de modelos hidrológicos utilizados, o modelo chuva-vazão concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) (Lopes, 1982) é amplamente aplicado (Mathias *et al.* 2015; Bacalhau *et al.* 2017), tendo como principais vantagens a baixa quantidade de parâmetros solicitados e demanda computacional (Campos *et al.* 2018) além de já ter sido utilizado para previsão hidroclimática (Lima e Alves, 2009).

As previsões hidroclimáticas na escala sazonal aliado a recursos para a modelagem da qualidade da água através da implementação de uma abordagem simplificada por meio de modelos

1) Mestranda, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, mariadelmirocha@gmail.com

2) Mestrando, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, j.hannover97@gmail.com

3) Mestrando, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, jonatha_marce@hotmail.com

4) Professor Adjunto. Afiliação: Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, cleitonsilveira@deha.ufc.br

5) Professor Adjunto. Afiliação: Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, iran@deha.ufc.br

6) Professora Adjunto. Afiliação: Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Av. Mister Hull, bloco 713, Pici, (85) 33669776, ticianastudart2010@gmail.com

vazão-concentração de nutrientes (Bowes et al. 2015) permitiria utilizar as previsões hidroclimáticas dinâmicas para gerar previsões de qualidade da água (Sharma et al 2019). Ademais, avaliar questões de sazonalidade de nutrientes e o índice de estado trófico de sistemas lóticos com eficiência (Alves et al. 2012; Barreto et al. 2014; Rocha e Lima Neto, 2018).

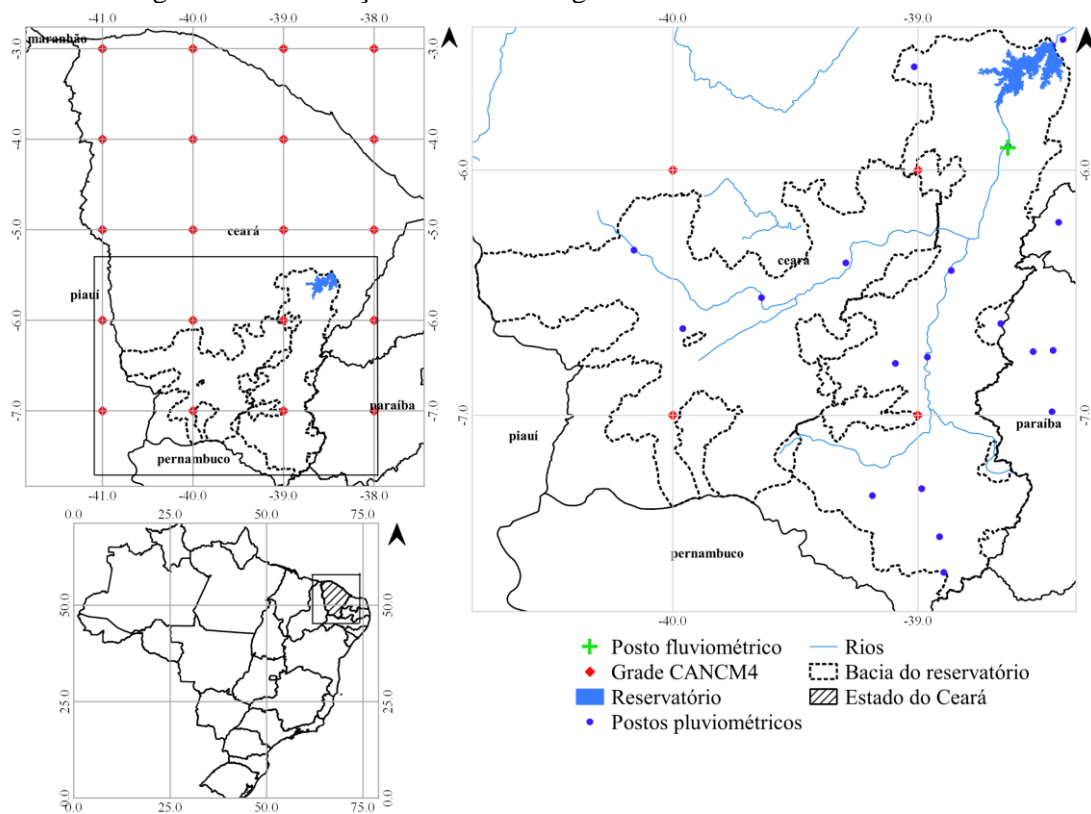
Deste modo, o objetivo deste trabalho é aplicar os dados previsão sazonal de precipitação do Modelo Canadense de Circulação Geral Oceano-Atmosfera de Quarta Geração (CanCM4) do NMME, avaliar a habilidade de previsão de precipitação sazonal do modelo para a região semiárida e, em seguida, obter as vazões afluentes em uma seção do rio Jaguaribe – CE para o período 2018-2021 por meio do modelo hidrológico SMAP. Almeja-se obter também a concentração de fósforo total através de correlações estatísticas vazão-concentração disponíveis e, em sequência, avaliar o índice do estado trófico do rio nas duas seções. Almeja-se, então, avaliar a integração entre clima, modelagem hidrológica e de qualidade da água como ferramenta de auxílio à gestão de bacias hidrográficas estratégicas.

METODOLOGIA

Área de abrangência dos estudos

A área de estudo abrange parte da Bacia do rio Jaguaribe correspondendo à bacia incremental do reservatório Castanhão, localizada no estado do Ceará, Brasil. Considerado o maior rio do estado, o Rio Jaguaribe apresenta um comprimento total de 633 km. Devido à grande dimensão de sua bacia hidrográfica, esta foi dividida em 5 regiões hidrográficas para gestão estadual. Ambos os reservatórios da área de estudo também têm como função perenizar este rio. O regime característico desse rio de acordo com dados de posto fluviométrico na cidade de Jaguaribe, monitorado pela Agência Nacional de Águas e a mais próximo do reservatório Castanhão, apresenta uma vazão média anual de 51,43 m³/s em que não há a completa seca do rio no período seco. No segundo semestre, em condições normais, o rio permanece completamente seco (Cabral, Campos e Silveira, 2017).

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do reservatório Castanhão



Modelo Canadense de Circulação Geral Oceano-Atmosfera de Quarta Geração (CanCM4) para previsão climática sazonal.

O modelo CanCM4, desenvolvido no Centro Canadense de Modelagem e Análise Climática (CCCma), é um dos modelos integrantes do Sistema Canadense de Previsão Sazonal para Interanual (CanSIPS) com previsão climática multi-sazonal disponibilizada globalmente (Merryfield et. al, 2013). Esse sistema de previsão climática sazonal é baseado em modelo acoplado de circulação geral oceano-atmosfera e tem seu desempenho amplamente referenciado para aplicações em escalas regionais (Salimum et. al, 2015), cabendo ainda a avaliação de sua habilidade nas escalas locais de interesse. As previsões de precipitações do CanCM4 consistem em um conjunto de 10 membros estimadas para escala diária. Os dados de precipitação prevista disponíveis deste modelo para a área de estudo compreendem os anos de 2018 a 2021, abrangendo a previsão para janeiro, fevereiro e março (JFM) de 2021 distribuídos espacialmente em uma grade regular com resolução de 1°.

O processo de extração e tratamento primários dos dados disponibilizados pelo modelo consiste na obtenção de todas as coordenadas da grade do modelo que possuem influência nas bacias de interesse para obtenção da precipitação média prevista na bacia pelo Método de Thiessen. A bacia incremental do Castanhão tem sete pontos de influência. Obtém-se, então, as séries de precipitações acumulada mensal para cada membro do modelo, realizando a média ponderada da precipitação por coordenada por meio do fator de ponderação de área de cada uma e, por fim, obtém-se a média simples dos membros para obter a série de precipitação acumulada mensal prevista representativa para a bacia.

Para se utilizar as precipitações obtidas de modelos climáticos, entretanto, é necessário a remoção de viés, procedimento este realizado utilizando a distribuição gama, aplicando a função de densidade acumulada (CDF). O objetivo é evitar um possível comportamento tendencioso, um viés dos dados oriundos dos modelos. Para cada valor de precipitação média mensal foram desenvolvidas duas curvas de distribuição empírica de probabilidade, uma com dados observados e outra com os dados previstos. A correção dos dados a partir do ajuste das distribuições de probabilidade foi realizada conforme metodologia descrita por Cabral, Campos e Silveira (2017).

Dados observados de precipitação e vazão

Os dados de vazão do rio Jaguaribe foram obtidos através da Agência Nacional de Águas (ANA) para o posto fluviométrico localizado no rio Jaguaribe de código 3616000 referenciado pelo nome de posto de Jaguaribe, respectivamente. A série contempla o período de 1950 a 2015 e para os dados em falta utilizou-se os valores obtidos por Estácio (2019). As precipitações foram utilizadas, em primeiro lugar, no processo de calibração e validação do modelo hidrológico, para a qual necessitou-se de uma série mais longa e, em segundo lugar, para a remoção de viés e validação dos dados climáticos no período de 2018-2019. Utilizou-se para o primeiro caso as séries de precipitação média de Thiessen disponíveis em Funceme (2020) que abrangem o período de 1911-2013 para as bacias de ambos os reservatórios. Para o segundo caso, obteve-se a precipitação média de Thiessen entre 2018 e 2019 a partir dos postos pluviométricos da ANA apresentados na Tabela 1.

Os dados de precipitações disponíveis pelos postos não apresentaram falha para o referido período e as áreas de influência de cada posto foram obtidas com o auxílio da ferramenta de geoprocessamento QuatumGIS®. Todos os postos pluviométricos da ANA que tinham dados disponíveis para o período foram utilizados para o cálculo da precipitação média das bacias. Ademais, a partir da série histórica obtida na Funceme, construíram-se as séries de precipitações mínima, média e máxima histórica de modo a avaliar os resultados da precipitação prevista pelo modelo CanCM4.

Tabela 1 – Coordenadas (latitude e longitude) dos postos pluviométricos da ANA utilizados para obter a precipitação média de Thiessen da área de estudo

Lat.	-5.5	-5.9	-5.6	-6.8	-6.4	-6.2	-6.7	-6.6	-6.4	-6.8	-7.3	-7.5	-7.4	-7.3
Long.	-38.4	-38.6	-39.4	-39.0	-38.9	-38.4	-38.5	-38.7	-39.3	-39.1	-39.0	-38.9	-38.3	-39.2

Modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP)

Para previsão de vazões a partir dos dados de precipitação sazonal para o rio Jaguaribe na seção do reservatório Castanhão, utilizou-se o modelo determinístico SMAP com passo de tempo mensal. Este modelo concentrado chuva-vazão apresenta uma metodologia simples baseada no balanço de massa de reservatórios hipotéticos desenvolvida por Lopes et al. (1982). Para o emprego do modelo fazem-se necessários os parâmetros calibrados do modelo, os dados observados de vazão e precipitação de forma a permitir a calibração e a validação (Nunes et al. 2014).

Calibração do modelo

Os parâmetros a serem calibrados são a capacidade de saturação do solo (Str), a taxa de geração do escoamento superficial (Kes), a abstração inicial (Ai), o parâmetro de recarga subterrânea (Crec), os parâmetros de inicialização teor de umidade inicial (tuin) e a vazão básica inicial (ebin). Os dois primeiros foram previamente calibrados para as bacias em estudo por Gondim et al. (2018). Os demais foram calibrados com o auxílio do *software* SH30 do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais.

O processo de calibração com o SH30 demanda séries médias mensais de vazão e precipitação observadas e evapotranspiração potencial para otimizar o coeficiente de Nash–Sutcliffe (NSE) e o coeficiente de correlação de Pearson (R^2) entre as vazões observadas e modeladas no processo de calibração dos parâmetros. Utilizaram-se para as duas primeiras variáveis a média das séries de vazão e precipitação observadas detalhadas anteriormente. Para obtenção da evapotranspiração potencial, empregou-se o método de Penman-Monteith da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (PM-FAO) com o auxílio do *software* CROPWAT desenvolvido pela mesma organização. Os dados climatológicos necessários para o cálculo da ETP foram obtidos das estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INEMET).

Foram usadas a média das variáveis temperatura mínima, temperatura máxima, umidade relativa do ar, insolação, velocidade dos ventos, latitude e altitude das estações de Barbalha e Iguatu. Optou-se pela média aritmética das variáveis das estações pois ambas apresentavam similar área de influência sobre a bacia. Com vistas a aumentar a performance dos parâmetros NSE e R^2 obtidos pelo SH30, pequenos ajustes manuais foram empregados. A Tabela 2 apresenta os valores calibrados para as duas bacias modeladas junto aos limites para cada parâmetro sugeridos por Lopes et al. (1982). Os valores de inicialização, vazão básica inicial e umidade inicial, próximos de zero para os parâmetros são mais representativos para bacias localizadas no semiárido.

Tabela 2 – Faixa de limites e valores adotados para os parâmetros de entrada do SMAP

Capacidade de saturação do solo (Str) - mm	$100 \leq 2000$	1605
Abstração inicial (Ai) - mm	$0 \leq 9$	2,5
Parâmetro de recarga subterrânea (Crec)	$0 \leq 100$	2,1%
Taxa de geração do escoamento superficial (Kes) - dias	$0.2 \leq 10$	4,12
Teor de umidade inicial (tuin)	-	0,04
Vazão básica inicial (ebin) – m ³ /s	-	0
Área da bacia - km ²	-	14698,8

Validação e aplicação

Com os parâmetros calibrados utilizou-se as séries de precipitação observadas para as bacias junto à ETP média das estações meteorológicas e os parâmetros calibrados para se validar o modelo. A série de precipitação engloba o período de 1950-2013, período do qual o primeiro ano foi usado para aquecimento do modelo. Uma vez calibrado e validado o modelo, a aplicação consistiu na utilização da série de precipitação prevista pelo modelo CanCM4 corrigidas o viés para o período de 2019-2021 para estimar as vazões geradas pelas bacias. Para o aquecimento do modelo neste período

utilizou-se a precipitação média de Thiessen obtidas para as bacias para os meses de julho a outubro de 2018. Todos esses processos buscaram otimizar as funções objetivo NSE e R².

Avaliação do Índice de estado trófico de rios

O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos hídricos em diferentes graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo de algas ou macrófitas aquáticas (Alves et al. 2012). Os resultados do índice calculado a partir dos valores de fósforo total (PT) devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como agente limitante desse processo (Barreto et al. 2014). Os corpos hídricos são classificados de acordo com o IET como ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico (Brasil, 2020). O cálculo do IET para rios é feito de acordo com a Equação 1, segundo Lamparelli (2004), a partir da concentração de fósforo total na coluna d'água.

$$IET = 10 \times \left(6 - \left(\frac{0,42 - 0,36 \times \ln(PT)}{\ln(2)} \right) \right) \quad (1)$$

A obtenção dos valores de PT para se calcular o IET deu-se por meio da utilização das equações obtidas por Rocha e Lime Neto (2018) que propuseram um modelo simplificado para correlacionar a concentração de fósforo total com diferentes níveis de vazão na seção do rio Jaguaribe próxima à entrada do reservatório Castanhão. As vazões estimadas neste trabalho encontraram-se todas dentro dos limites das vazões utilizadas pelos autores para o reservatório Castanhão. Ademais, os períodos de 2019 e 2020 também apresentaram características no regime de precipitação semelhantes aos anos dentro do período usado pelos autores para calibrar e validar as equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Previsões sazonais para a precipitação

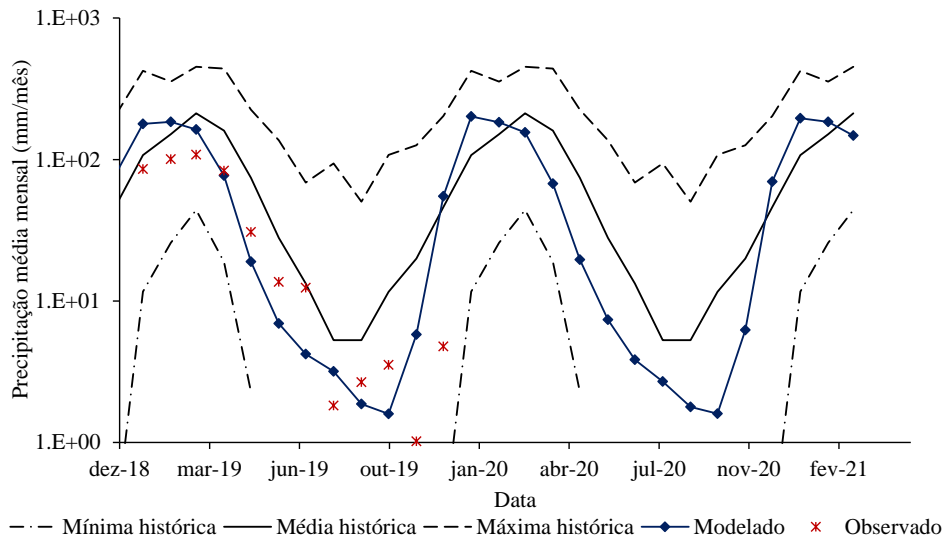
A Figura 2 apresenta o ciclo anual das precipitações observadas e prevista pelo CanCM4 para a bacia do reservatório Castanhão. Estão representados os dados observados do período de janeiro/2019 a dezembro/2020, bem como dados modelados, máxima, média e mínima precipitação histórica de dezembro/2018 a fevereiro/2021. A precipitação observada total anual para 2019 na bacia do Castanhão foi de 448,38 mm/ano observado e 791,18 mm/ano. Mensalmente, precipitações modeladas para a bacia do Castanhão variam de 1,59 a 201,68 mm com média no período chuvoso de 125,04 mm.

Conforme pode-se observar na Figura 2, a precipitação média observada apresentou-se relativamente abaixo da média histórica e a precipitação modelada superestimou a média, principalmente no início do período chuvoso. Os meses de março, abril e maio foram os que apresentaram o menor desvio médio percentual para ambas as bacias. As previsões do CanCM4 foram maiores em magnitude do que as observadas durante o início da estação chuvosa e menores para os meses de precipitações observadas mais intensas. No entanto, o modelo apresentou um desempenho relativamente melhor a partir de maio, já no fim do período chuvoso. Salimum et al. (2015) observou, para a área em que trabalhou, que o CanCM4 reproduz a climatologia sazonal das chuvas razoavelmente bem para algumas estações do ano, mas não tão bem para outras apresentando desvios mais acentuados, principalmente na estação chuvosa. As imperfeições inerentes às previsões dos modelos climáticos e podem ser reflexo das restrições das condições iniciais do modelo pelo estado climático observado em um determinado momento (Merryfield et al. 2013).

O ajuste realizado por meio do coeficiente de aderência R² entre as vazões mensais modeladas e observadas pelo CanCM4 resultou em R² de 0,84 para a bacia do Castanhão, configurando-se em bons coeficientes de ajuste apesar da observação da superestimação por parte do modelo para o início do período chuvoso. Deste modo, acerca do período correspondente a previsão da precipitação para o qual ainda não se dispõe de dados observados, de maio de 2020 à março de 2021, nota-se que a

bacia apresenta precipitações previstas que tendem a ultrapassar a média histórica nos primeiros meses do período chuvoso do ano subsequente. Esse aspecto pode indicar a expectativa de aumento no volume precipitado na bacia até agora apesar do aspecto que esta característica de superestimação já vem sendo observada nas previsões do modelo.

Figura 2 – Precipitações estimadas para o intervalo jul/2020 a mar/2021.



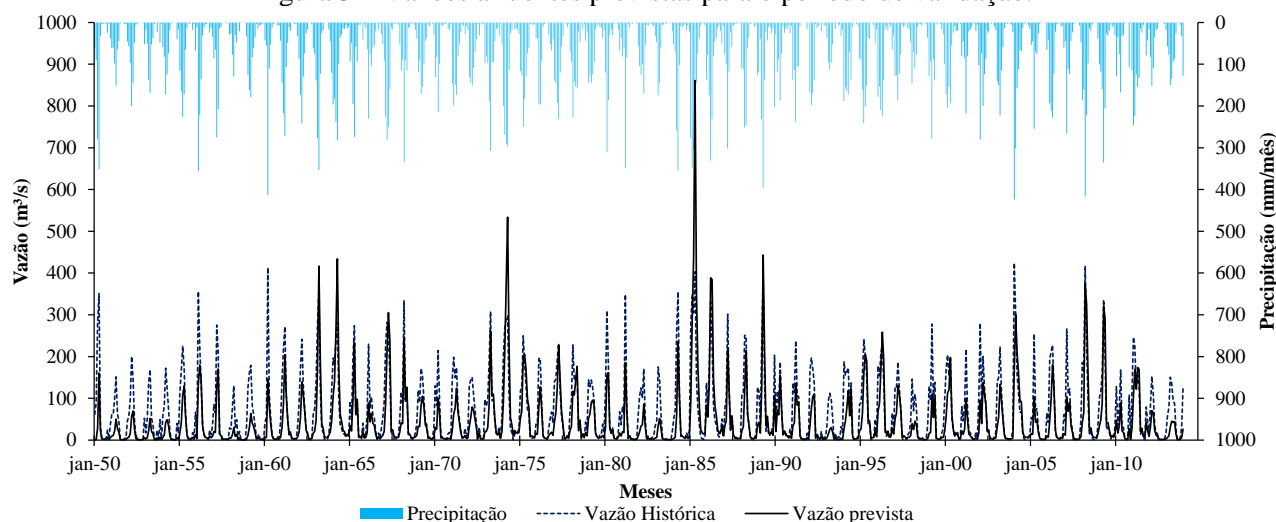
Calibração do modelo hidrológico

A aderência entre a vazão simulada e a observada utilizando-se o *software* SH30 durante o processo de calibração dos parâmetros do modelo para a bacia do reservatório Castanhão resultou em valor de R^2 de 0,83 e um NSE de 0,82. Collischonn (2001) ressalta que valores de NSE acima de 0,75 são considerados eficazes para a representatividade do modelo, reforçando assim que os valores obtidos para este trabalho refletem a boa calibração da parametrização empregada. Valores de R^2 e NSE superiores, respectivamente, a 0,88 e 0,71 são comumente encontrados no processo de calibração do modelo SMAP em outros trabalhos (Bacalhau et al. 2017; Campos et al. 2018)

Validação do modelo hidrológico

O hidrograma das vazões modeladas e observadas para o período de validação do modelo é apresentado na Figura 3. A partir dos parâmetros calibrados, aplicou-se toda a série de precipitações observadas disponível para a bacia para se obter as vazões modeladas e, sequencialmente, comparar às respectivas vazões observadas. Lopes et al. (1982) sugere um período que abrange a calibração e a validação de dois a nove anos. Utilizou-se, entretanto, o período mais amplo devido à disponibilidade. A qualidade do ajuste foi analisada observando-se a aderência das vazões calculadas às observadas com as métricas de desempenho coeficiente de correlação linear de Pearson (R^2) e índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE). A validação das vazões obtidas pela calibração resultou em R^2 de 0,64 e NSE de 0,54, configurando-se em bons resultados finais (Lima e Alves, 2009). Mathias et al. (2015) apresentam diagramas ternários para a variação na qualidade do ajuste para o modelo SMAP onde a variação bastante acentuada da qualidade do ajuste avaliada pelo autor depende principalmente dos tipos de solo da bacia.

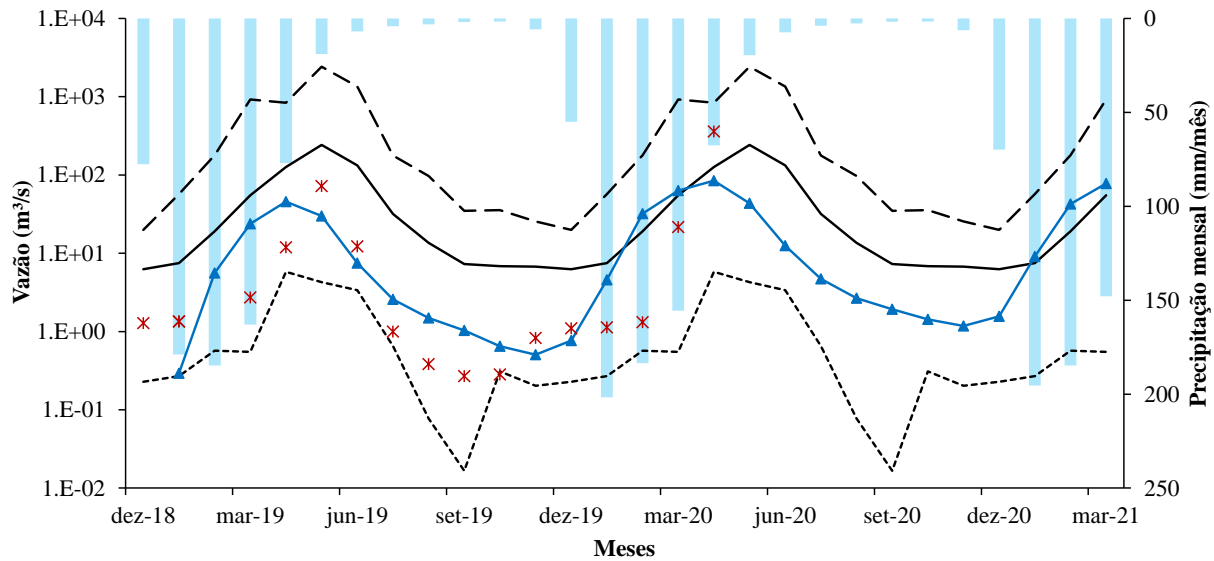
Figura 3 – Vazões afluentes previstas para o período de validação.



Vazões previstas

A Figura 4 apresenta os resultados das vazões modeladas pelo SMAP para o período de dezembro de 2018 a março de 2021 a partir das precipitações corrigidas previstas pelo modelo CanCM4. Esta também mostra os valores das vazões mínima, média e máxima mensal histórica observadas e as vazões observadas nos postos fluviométricos da seção de validação de cada bacia para o mesmo período. As vazões modeladas variaram de 0,29 a 91,40 m³/s com média anual de 21,21 m³/s e média no período chuvoso de 34,80 m³/s. Destaca-se que a vazão média do período chuvoso foi inferior à média histórica de 51,43 m³/s bem como toda a vazão modelada aproximou-se mais da série de vazão mínima histórica para a seção. Os valores modelados, em alguns meses, são superestimados, ocorrendo, em contra partida, a subestimação das vazões do mês de abril, mês de elevada precipitação do período chuvoso. Os coeficientes R² e NSE obtidos para a seção do Castanhão foram de 0,53 e 0,32, respectivamente. Moriasi et al (2007) classificam os valores de NSE como muito bons entre 0,75 e 1, como bons valores acima de 0,65 e como satisfatórios valores acima de 0,50. Portanto, os valores obtidos neste trabalho de 0,44 e 0,32 estão na faixa de baixo aceitável, mas ainda assim considerados satisfatórios pois as bacias modeladas são conhecidamente bacias semiáridas (Lima e Alves, 2009). Para o período de previsão do qual não se dispõe ainda de dados, maio de 2020 a março de 2021, a vazão na seção do Castanhão se aproxima e se eleva um pouco da média principalmente para os meses da pré-estação chuvosa, indicando um aumento nas vazões observadas até então nesta seção que tem enfrentado um período de vazões bastante abaixo da média histórica.

Figura 4 – Vazões afluentes previstas para o reservatório Castanhão para Dez/18 a Mar/21.



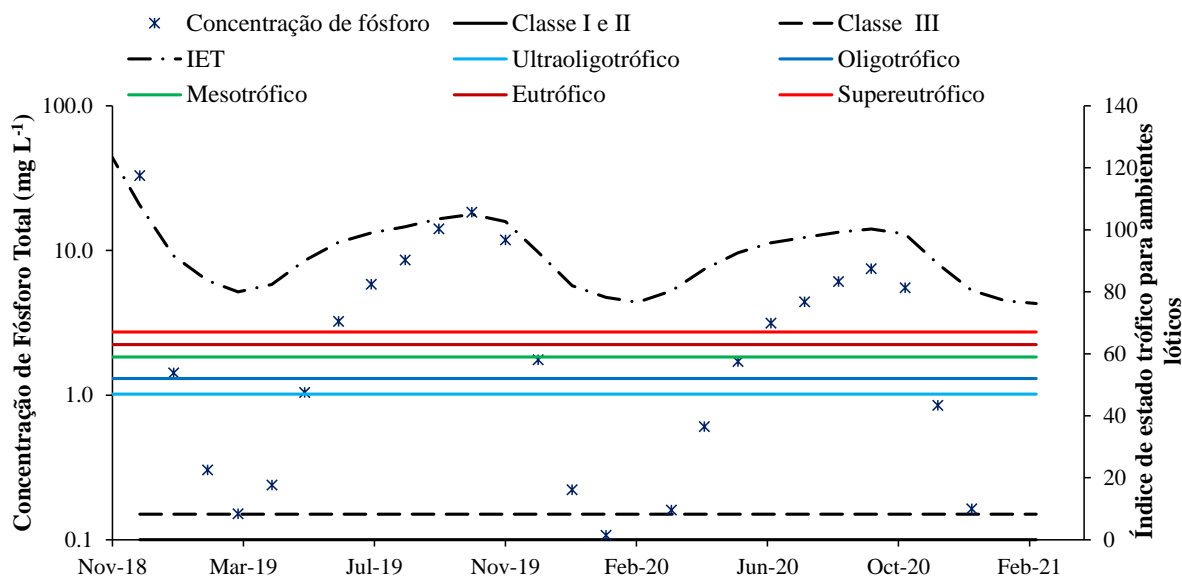
Avaliação da qualidade da água para o período de previsão

A Figura 5 apresenta os resultados das concentrações de PT estimadas para o rio Jaguaribe na seção afluente ao reservatório Castanhão junto ao índice de estado trófico. Apresentam-se também as concentrações limites para PT em ambientes lóticos de classe I, II e III de acordo com a resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005), respectivamente, 0.1 e 0.15 mg/L, tendo as classes I e II o mesmo limite. Ademais, observam-se as curvas que limitam o Índice de Estado Trófico variando de ultraoligotrófico até hipereutrófico. Nota-se que as concentrações de PT ficam dentro dos valores limites estabelecidos pela resolução apenas nos meses do período chuvoso com maior volume precipitado na região, março e abril. As concentrações de PT variaram de 0.07 a 32.9 mg/L com média de 4.65 mg/L. Assim, a maior parte dos valores de PT obtidos está significativamente superior aos padrões de qualidade da água, havendo, entretanto, o respeito aos padrões normatizados durante parte do período chuvoso.

Quanto ao IET, a curva apresentou uma oscilação característica passando por todos os níveis de estado trófico como consequência da mudança na vazão da seção (Barreto et al. 2014). Para as maiores vazões no período chuvoso há uma melhora na qualidade da água no rio como efeito da diluição do poluente (Bowes et al. 2015) e, para menores vazões, há uma piora com um aumento da concentração de PT. Observa-se então um forte padrão sazonal nas características da qualidade da água deste rio nas duas seções analisadas.

A seção permaneceu 66% do tempo com IET melhor ou igual a oligotrófico e igual ou pior que eutrófico, podendo-se, assim, classificar as águas do rio Jaguaribe na seção estudada com elevado nível de trofia, o que reflete a grande disponibilidade de fósforo (Alves et al. 2012). Quanto as concentrações previstas para os primeiros meses do período chuvoso de 2021, estas seguem um padrão similar aos anos anteriores, o que gera maior confiabilidade nas estimativas pois a maior variabilidade na estimativa da concentração de nutrientes relativas a habilidade das previsões de vazão por características dos dados climáticos é mais marcante principalmente em pequenas bacias, não refletindo em grande parte as bacias estudadas, além da qualidade das previsões apresentarem-se melhor para o período chuvoso (Sharma et al 2019).

Figura 5 – Concentração de fósforo total afluente para o período e estado trófico para o rio Jaguaribe na seção de Jaguaribe.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou a aplicabilidade e a qualidade dos dados de precipitação sazonal prevista pelo Modelo CanCM4 para a região da bacia do reservatório Castanhão, obteve as vazões afluentes na seção do rio Jaguaribe – CE próxima a este reservatório para o período 2018-2021 por meio do modelo hidrológico SMAP e calculou o índice de estado trófico do rio nesta seção a partir da concentração de fósforo total estimada através de correlações estatísticas vazão-concentração disponíveis na literatura para a área de estudo.

As precipitações corrigidas previstas pelo modelo CanCM4 superestimaram as precipitações observadas principalmente no início do período chuvoso. Os meses de março, abril e maio, porém, foram os que apresentaram o menor desvio médio percentual entre as precipitações estimadas e observadas. O R^2 entre as precipitações prevista e observada foi de 0,84. Para a simulação das vazões no modelo SMAP a partir da as precipitações previstas, o processo de calibração do modelo resultou em um NSE de 0,82 e a validação em um NSE de 0,54, indicando o bom ajuste do modelo.

A aplicação do SMAP para simular as vazões para o período dos dados de precipitação do modelo sazonal resultou em um NSE entre as vazões simuladas e observadas de 0,32. Os valores modelados apresentaram-se em alguns meses superestimadas, ocorrendo, em contra partida, a subestimação das vazões do mês de abril, mês de elevada precipitação do período chuvoso, desvios esses potencialmente advindos dos dados de precipitação.

Por fim, a avaliação do índice de estado trófico do rio Jaguaribe, na seção à montante do reservatório avaliado, para o período 2018-2021 resultou em uma curva de oscilação característica passando por todos os níveis de estado trófico como consequência da mudança na vazão da seção. Para as maiores vazões no período chuvoso observou-se uma melhora na qualidade da água no rio como efeito da diluição do poluente. A seção permaneceu 38% e 62% do tempo com IET melhor ou igual a oligotrófico e igual ou pior que eutrófico, respectivamente. Pode-se, assim, classificar as águas do rio Jaguaribe na seção estudada com elevado nível de trofia e indicando a grande disponibilidade de fósforo.

REFERÊNCIAS

ALVES, I. C. C.; EI-ROBRINI, M.; SANTOS, M. L. S.; MONTEIRO, S. M.; BARBOSA, L. P. F.; GUIMARÃES, J. T. F. (2012) Qualidade das águas superficiais e avaliação do estado trófico do Rio Arari (Ilha de Marajó, norte do Brasil). Acta Amazônica. vol. 42. n. 1. Pp.: 115 – 124.

BACALHAU, José Ráurium; RIBEIRO NETO, Alfredo; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima. Water supply reservoir operation in relation to climate variability: pirapama river basin (pernambuco-brazil). *Journal of Urban And Environmental Engineering*, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 279-287. Doi: 10.4090/juee.2016.v10n2.279287.

Barreto, L. V.; Fraga, M. S.; Barros, F. M.; Rocha, F. A.; Amorim, J. S.; Carvalho, S. R.; Bonomo, P.; Silva, D. P. (2014) Estado trófico em uma seção do rio Catolé Grande sob diferentes níveis de vazão. *Rev. Ambient. Água* vol. 9 n. 2. Doi: 10.4136/ambi-agua.1231.

Bowes, M.J.; Jarvie, H. P.; Halliday, S. J.; Skeffington, R. A.; Wade, A. J.; Loewenthal, M.; Gozzard, E.; Ewman, J. R. N. e Palmer-Felgate, E. J. (2015) Characterising phosphorus and nitrate inputs to a rural river using high-frequency concentration–flow relationships. *Science of The Total Environment*, 511, 608-620, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.12.086.

Brasil (2005) Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 – In: Resoluções, 2005. Acesso em 10 de novembro de 2017, disponível em: <http://www.mma.gov.br>

Brasil (2020) Agência Nacional de Águas, ANA. Acesso em 10 de junho de 2020, disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>

CABRAL, Samuellson Lopes; CAMPOS, José Nilson Bezerra; SILVEIRA, Cleiton da Silva. Coupling the atmospheric model RAMS 6.0 /ECHAM 4.1 to hydrologic model SMA/HMS for operating a reservoir in Brazil's semiarid. *Rbrh*, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 1-10, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716071>.

CAMPOS, Danusa Oliveira; SANTOS, José Wildes Barbosa dos; ASSIS, Pablo Roberto de. (2018) Aplicação do modelo hidrológico SMAP na determinação da produção de água em uma bacia hidrográfica costeira. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 11, n. 1, p. 124-138. Doi:10.26848/rbgf.v11.1.p124-138.

COLLISCHONN, W., 2001. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese (Doutorado). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COSTA, J. A.; SILVA, D. F. (2017) Distribuição espaço-temporal do Índice de anomalia de chuva para o Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Pernambuco, v. 10, n. 4, p.1002-1013, 01.

Estácio, Ályson Brayner Sousa. Climate change and model parameter uncertainties propagated to ungauged reservoir catchments in ceará: a study for water availability assessment. 2019. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, 69 f.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia (2020). Calendário de Chuvas do estado de Ceará. Acesso em 20 de maio de 2020, disponível em: <http://www.funceme.br/app/calendario/>

GONDIM, RUBENS; SILVEIRA, CLEITON ; DE SOUZA FILHO, FRANCISCO ; VASCONCELOS, FRANCISCO ; CID, DANIEL . Climate change impacts on water demand and availability using CMIP5 models in the Jaguaribe basin, semi-arid Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, p. 1-14, 2018.

LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 238 p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Lima, J. P. R.; Alves, J. M. B., 2009. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 323-338.

Lopes, J.E.G., Braga B.P.F., Conejo J.G.L., 1982. SMAP - A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, 1 ed. V. P. Singh, Colorado.

MATHIAS, Simon A.; SKAGGS, Todd H.; QUINN, Simon A.; EGAN, Sorcha N. C.; FINCH, Lucy E.; OLDHAM, Corinne D. (2015) A soil moisture accounting-procedure with a Richards' equation-based soil texture-dependent parameterization. *Water Resources Research*. v. 51, n. 1, p. 506-523.doi: 10.1002/2014wr016144.

MERRYFIELD, William J. et al. The Canadian Seasonal to Interannual Prediction System. Part I: models and initialization. *Monthly Weather Review*, [s.l.], v. 141, n. 8, p. 2910-2945, ago. 2013. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/mwr-d-12-00216.1>.

MORIASI, D.N, ARNOLD, J.G, VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3), 885-900.

NUNES FMS, FARIAS CAS, MARTINS WA, ALMEIDA RN, LEITE JCA (2014) Hydrological modeling by SMAP for estimation of monthly flows in the Piancó river basin. *Green Mag Agroecol Sustain Dev* 9(3):289–295

Rocha, M. J. D.; Lima Neto, I. E. (2018) Relação entre fósforo total e vazão afluente nos principais reservatórios rurais do Estado do Ceará no semiárido brasileiro, *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, (aceito para publicação).

SHARMA, S.; GALL, H.; GIRONÁS, J.; MEJIA, A. (2019) Seasonal hydroclimatic ensemble forecasts anticipate nutrient and suspended sediment loads using a dynamical-statistical approach. *Environmental Research Letters*. v. 14, n. 8, p. 084016. Doi: 10.1088/1748-9326/ab2c26.