

Otimização qualitativa em sistemas hídricos: aplicação em região do alto curso do rio Piranhas (PB)

O presente trabalho tem como objetivo efetuar a otimização qualitativa, baseada em Programação Linear, em um sistema de recursos hídricos presente no alto curso do rio Piranhas-PB que integra dois reservatórios em série, Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras, e São Gonçalo, no município de Sousa. A rotina de otimização considera cinco funções objetivo, além de restrições relacionadas à modelagem da Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, formas nitrogenadas e fosfatadas, nos rios e reservatórios, bem como os métodos empregados para linearizar as não linearidades existentes. Além do mais, foi também avaliado o grau de representatividade da modelagem para com a área de estudo. Os efluentes estão associados ao lançamento de esgotos domésticos de municípios próximos aos corpos hídricos. Foram estudados dois Cenários, no primeiro os efluentes foram lançados sem considerar um tratamento prévio, já no segundo Cenário foi considerado que os efluentes foram submetidos a um tratamento por meio de lagoas de estabilização. Os resultados indicaram que o modelo de otimização permitiu, nos dois Cenários, encontrar soluções otimizadas de maneira que as concentrações dos parâmetros permanecessem, durante todo o período de operação, em níveis aceitáveis para a classe dos corpos hídricos. Além disto, as equações matemáticas e os coeficientes cinéticos puderam representar de forma adequada a área de estudo, com baixos erros calculados.

Palavras-chave: Programação linear; Recursos hídricos; Qualidade de água.

Qualitative optimization in water resources systems: application at Piranhas river's upper course (PB)

The present work aims to carry out the qualitative optimization, based on Linear Programming, in a water resources system present in the upper course of the Piranhas (PB) river that integrates two series reservoirs, Engenheiro Ávidos, located in the municipality of Cajazeiras, and São Gonçalo, in the municipality of Sousa, both at State of Paraíba. The optimization routine considers five objective functions and constraints related to modeling the Biochemical Oxygen Demand, Dissolved Oxygen, nitrogen and phosphate forms, in rivers and reservoirs, as well as the methods employed to linearize as existing nonlinearities. Furthermore, the degree of representativeness of the modeling for the study area was also evaluated. Effluents are associated with the discharge of domestic sewage from municipalities close to water bodies. Two Scenarios were studied, in the first the effluents were released without considering a previous treatment, in the second Scenario it was considered that the effluents were subjected to treatment through stabilization ponds. The results indicated that the optimization model allowed, in both Scenarios, to find optimized solutions so that the parameter concentrations remained, throughout the operation period, at acceptable levels for the class of water body. Mathematical equations and kinetic coefficients, furthermore, could adequately represent the study area, with low calculated errors.

Keywords: Linear programming; Water resources; Water quality.

Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **07/03/2022**

Approved: **23/03/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Thiago Nepomuceno

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
thiago.nepomuceno@hotmail.com

Wilson Fadlo Curi

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4941338019932170>
<https://orcid.org/0000-0002-7024-7127>
wfcuri@yahoo.com.br

Valterlin da Silva Santos

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4740303724015282>
<https://orcid.org/0000-0002-4789-2937>
valterlin@yahoo.com.br

Francisco de Assis da Costa Neto

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6054580787671400>
<https://orcid.org/0000-0001-9681-3919>
francisco.costa@ufcg.edu.br

Virginia da Costa Brito

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3293234957426500>
<https://orcid.org/0000-0002-5776-0612>
virginia.dcb@gmail.com

Cícero Fellipe Diniz de Santana

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-9228-3903>
cicero.esa@hotmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.003.0010

Referencing this:

NEPOMUCENO, T.; CURTI, W. F.; SANTOS, V. S.; COSTA, F. A. N.; BRITO, V. C.; SANTANA, C. F. D.. Otimização qualitativa em sistemas hídricos: aplicação em região do alto curso do rio Piranhas (PB). *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.3, p.120-130, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.003.0010>

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos superficiais vêm sofrendo significativa pressão antrópica, seja por meio do aumento das demandas hídricas ou devido ao constante lançamento de efluentes, que possuem as mais variadas fontes (HAN et al., 2020; VALIALLAH et al., 2021).

Essa problemática torna-se ainda mais latente em regiões com baixa disponibilidade hídrica, como o semiárido brasileiro, com corpos hídricos intermitentes que possuem menor capacidade de diluição dos efluentes (OLIVEIRA et al., 2017; VALCARCEL et al., 2020). Segundo Martinsen et al., (2019), a qualidade da água deve ser considerada em todas as etapas do planejamento dos recursos hídricos, sendo importante o desenvolvimento de ferramentas que permitam avaliá-la adequadamente (FU et al., 2019).

A modelagem matemática é um dos principais procedimentos metodológicos que vêm sendo empregados para o estudo da qualidade das águas superficiais, de maneira que a dinâmica comportamental dos diversos constituintes pode ser quantificada, assim como a possibilidade de prever cenários críticos, o que pode favorecer a construção de ações e programas para equacionar o problema e evitar o colapso hídrico (LIMA et al., 2018; LIANG et al., 2020).

Entre as técnicas de modelagem, nota-se a otimização, que permite, por exemplo, melhorar as variáveis de decisão a partir da maximização ou minimização de um ou mais objetivos de maneira que uma série de restrições possam ser atendidas (BABAMIRI et al., 2021; DEREPAŠKO et al., 2021). Sendo assim, métodos de otimização podem auxiliar no estabelecimento de práticas operacionais mais eficientes (KAMALI et al., 2017). Um destaque entre as técnicas de otimização é a programação linear, em que as funções objetivo e restrições apresentam comportamento linear (ABDEL et al., 2019).

A programação linear permite encontrar um ótimo global, caso ele exista, possui aplicabilidade em problemas de larga escala e as não linearidades podem ser contornadas por meio de artifícios de linearização (SIVAPURAM et al., 2018). Sendo uma das técnicas de otimização que mais se desenvolveu, possui grande aplicação na engenharia de recursos hídricos, em problemas de planejamento agrícola, otimização de redes de distribuição de água, alocação ótima de água para o atendimento de múltiplas demandas e modelagem da qualidade da água (ZHANG et al., 2018; SANTOS et al., 2011; VEINTIMILLA et al., 2018; ZHOU et al., 2018; CASSIOLATO et al., 2021; BOAH et al., 2020).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar a otimização multiobjetivo, qualitativa, baseada em programação linear, em um sistema de recursos hídricos localizado no semiárido nordestino brasileiro, buscando condições ótimas para que as concentrações dos parâmetros estudados permaneçam em níveis que respeitem a legislação vigente.

METODOLOGIA

Funções objetivo do modelo qualitativo

O modelo de otimização possui cinco funções objetivo, que compreendem, basicamente, a minimização do déficit entre a μ -ézima concentração do parâmetro p nos nós ou reservatórios do sistema

estudado ($C_{p,\mu,t}$) e as concentrações meta ($C_{pmeta,\mu,t}$). Sendo assim, na Equação 1 encontra-se a função objetivo quadrática padrão empregada para cada parâmetro.

$$C_{p,\mu} = \begin{cases} \sum_t \left(\frac{C_{pme_{\mu,t}} - C_{p,\mu,t}}{C_{pmeta,\mu,t}} \right)^2 & \text{se } C_{p,\mu,t} > C_{pmeta,\mu,t} \\ 0 & \text{se } C_{p,\mu,t} \leq C_{pmeta,\mu,t} \end{cases} \quad (1)$$

Os parâmetros de qualidade de água aos quais referem-se as funções objetivo são a DBO, amoníaco, nitrato, fosforo total e OD. Para os quatro primeiros, a resolução 357/2005 do CONAMA estabelece limites máximos de acordo com a classe em que os corpos hídricos estão enquadrados. No caso do OD, os níveis definidos correspondem a valores mínimos a serem mantidos no meio aquático. A Equação 1 foi linearizada por meio do Artificio de Linearização por Segmentos, dividindo-se a concentração em 4 segmentos, de acordo com as equações 2 e 3.

$$\left(\frac{C_{pmeta,\mu,t} - C_{p,\mu,t}}{C_{pmeta,\mu,t}} \right)^2 = \sum_{h=2}^4 \phi_{C_{\mu,p,h-1}} * C_{\mu,p,h,t} \quad (2)$$

$$C_{p,\mu,t} = \sum_{h=2}^4 C_{\mu,p,h,t} \quad (3)$$

Sendo h os segmentos da concentração do parâmetro p no reservatório r ou no s no mês t, $h = 1, \dots, 4$; $\phi_{C_{\mu,p,h-1}}$ a declividade do segmento de reta anterior da função objetivo destinada ao atendimento da μ -ésima concentração permitida do parâmetro p no mês t; $C_{\mu,p,h,t}$ o incremento da μ -ésima concentração do parâmetro p no mês t, que é limitado por:

$$0 \leq C_{\mu,p,h,t} \leq \begin{cases} C_{pmeta_{\mu,t}} & \text{se } h = 1 \\ 0,5C_{pmeta_{\mu,t}} & \text{se } h = 2,3 \\ C_{pmax_{\mu,t}} - 2C_{pmeta_{\mu,t}} & \text{se } h = 4 \end{cases} \quad (4)$$

Sendo $C_{pmax_{\mu,h,t}}$ o valor máximo para o parâmetro p no mês t. Para levar em consideração o caráter multiobjetivo do modelo, foi utilizado o Método das Ponderações, onde cada função objetivo foi normalizada. Assim, a função multiobjetivo para o modelo de otimização qualitativo (FO_{quali}) encontra-se na Equação 5. Sendo ω o coeficiente de ponderação relacionado à importância ou prioridade de atendimento entre as funções objetivo.

$$\begin{aligned} \min FO_{quali} = & \sum_{\mu} \omega_{6,\mu} * CDBO_{\mu} + \sum_v \omega_{7,v} * COD_v + \sum_p \omega_{8,p} * CPT_p \\ & + \sum_q \omega_{9,q} * CNAMON_q + \sum_u \omega_{10,u} * CNITRA_u \end{aligned} \quad (5)$$

Equações de restrição do modelo qualitativo

Para a modelagem dos parâmetros de qualidade de água no reservatório r no mês t é realizado um balanço de massa mensal (Figura 6), considerando os mecanismos e as reações de conversão para cada elemento estudado, sendo o modelo hidráulico o de mistura completa, de acordo com a Equação utilizada por Larentis et al. (2008).

$$\frac{dC_{c,r,t}V_{r,t}}{dt} = \left(\sum_{c=1}^n C_{c,t}xQ_{r,t} + \sum_{c=1}^n C_{c,r,t}xV_{r,t}xK_{c,r,t} \right) - \left(\sum_{c=1}^n Q'_{r,t}xC_{c,r,t} + \sum_{c=1}^n C_{c,r,t}xV_{r,t}xK'_{c,r,t} \right) \quad (6)$$

Sendo $C_{c,r,t}$ a concentração do constituinte c no reservatório; $V_{r,t}$ o volume do reservatório; $Q_{r,t}$ a vazão

afluente ao reservatório; $C_{c,t}$ a concentração do constituinte c na vazão afluente ao reservatório; $K_{c,r,t}$ o coeficiente que representa a entrada de um constituinte c no reservatório r por meio de uma reação de conversão; $Q'_{r,t}$ a vazão defluente do reservatório; $K'_{c,r,t}$ o coeficiente que representa a saída de um constituinte no reservatório r por meio de conversão, sedimentação ou outras formas.

A concentração de um determinado parâmetro após a mistura instantânea em um nó s , durante o mês t , foi determinada a partir da média ponderada entre as vazões e as concentrações dos componentes que se misturam. Para os trechos do rio foi considerado o fluxo em pistão, sendo a modelagem específica de cada elemento no trecho c presente nas Equações 7 a 13.

$$\frac{dDBO_c}{dt} = (Kd_c + Ks_c) * DBO_c \quad (7)$$

$$\frac{OD_c}{dt} = -Kd_c * DBO_c + K_{2c} * (OD_{satc} - OD_c) - R_{o2Namon} * Kan_c * Namon_c \quad (8)$$

$$\frac{dN_{org_c}}{dt} = -K_{oa_c} * N_{org_c} - K_{so_c} * N_{org_c} \quad (9)$$

$$\frac{dN_{amon_c}}{dt} = K_{oa_c} * N_{org_c} - K_{an_c} * N_{amon_c} \quad (10)$$

$$\frac{dN_{itrato_c}}{dt} = K_{an_c} * N_{amon_c} \quad (11)$$

$$\frac{dP_{org_c}}{dt} = -K_{oi_c} * P_{org_c} - K_{spo_c} * P_{org_c} \quad (12)$$

$$\frac{dP_{inorg_c}}{dt} = K_{oi_c} * P_{org_c} \quad (13)$$

Sendo DBO_c a concentração do parâmetro DBO; Kd_c o coeficiente de decomposição da DBO; Ks_c o coeficiente de sedimentação da matéria orgânica suspensa; OD_r a concentração do parâmetro OD; OD_{satc} a concentração de saturação do OD; K_{2c} o coeficiente de reaeração; N_{org_c} é a concentração de nitrogênio orgânico; K_{oa_c} é o coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico a amônia; K_{so_c} é o coeficiente de remoção de nitrogênio orgânico por sedimentação; N_{amon_c} é a concentração de nitrogênio amoniacal; K_{an_c} é a coeficiente de conversão de amônia a nitrato; $R_{o2Namon}$ é a relação entre consumo de oxigênio e oxidação da amônia (4,0 mgO₂/L por mgN_{amon}/L); N_{itrato_c} é a concentração de nitrato.

As Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs), Equações 7 a 13, foram solucionadas a partir da utilização do método do fator integrante. Por meio da multiplicação das EDOs por uma determinada função, fator integrante, é possível obter uma solução analítica para as mesmas (ORTEGA *et al.*, 2018). As respectivas equações foram linearizadas pela técnica conhecida por Aproximações Lineares (CIRILO, 2002), com base na seguinte expressão geral:

$$\sum_{w=1}^{nj} \frac{\partial h_w(X^{u-1})}{\partial X_w} (X^u - X^{u-1}) = -h_w(X^{u-1}) \quad (14)$$

Em que X é um vetor com n_j variáveis de decisão e $h_w(X)$ a w -ésima restrição de igualdade. Definidos os valores iniciais (X^0), a otimização deve ser realizada até que o critério de convergência seja satisfeito (Equação 15). Sendo ε_j o limite de cálculo estabelecido para que a solução permaneça na região viável.

$$[X_j^u - X_j^{u-1}] \leq \varepsilon_j \quad (15)$$

Área de estudo

O sistema estudado integra os reservatórios ligados em série Engenheiro Ávidos, localizado no município de Cajazeiras-PB, e São Gonçalo, localizado no município de Sousa-PB, ambos inseridos em clima semiárido (entre as latitudes 6°50' e 7°25' Sul e entre as longitudes 38°10' e 38°40' Oeste). A Figura 1 compreende o layout qualitativo do sistema, sendo consideradas as cargas domésticas e a contribuição da vazão do Projeto de Integração das Águas do Rio São Francisco (PISF), Eixo Norte.

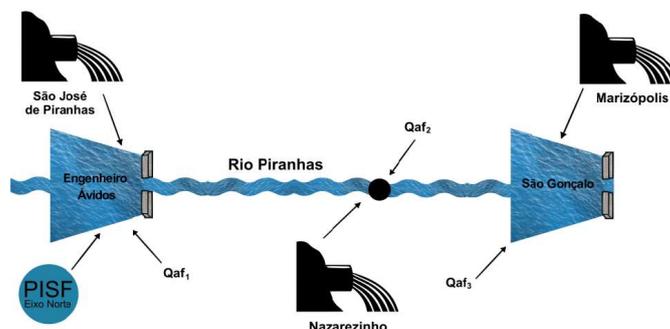


Figura 1: Layout qualitativo do sistema.

O modelo de otimização foi aplicado em dois Cenários, no primeiro os efluentes domésticos foram lançados sem um tratamento prévio. Já no segundo Cenário proposto foi considerado um tratamento dos esgotos por meio de lagoas anaeróbias seguidas de facultativas, sistema compatível com a área de estudo, devido, por exemplo, a áreas disponíveis para a implantação das unidades de tratamento e condições climáticas favoráveis ao processo da biodegradação (ARTHUR, 1983).

O período de operação do sistema foi de dez anos (120 meses), os dados de precipitação, evaporação, evapotranspiração para o cálculo das vazões afluentes nos reservatórios e nós, foram obtidos para os anos entre 2011 e 2020 e os volumes iniciais adotados para os reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo foram os correspondentes a 50% da capacidade total.

Dados para a modelagem da qualidade da água

As informações e os dados da área de estudo utilizados para efetuar a otimização estão presentes no Quadro 1.

Quadro 1: Dados e informações da área de estudo para a otimização qualitativa.

Contribuição <i>per capita</i> para os efluentes (g.hab ⁻¹ .dia ⁻¹)		Sperling (2014).
Vazões dos esgotos	Determinadas a partir das vazões de abastecimento dos municípios	Marco Regulatório (ANA,2018).
	Coefficiente de retorno de 0,80	Sperling (2014).
Contribuições qualitativas das vazões afluentes	Adotados de acordo com a Classe	CONAMA Nº 357/2005.
Classe do rio e reservatórios	Adotada a classe 2 quando não se dispõe de informações necessária para o Enquadramento	Resolução Nº 91/2008.
Concentrações iniciais para os corpos hídricos (reservatórios e rios)		Programa de Estímulo à Divulgação de Dados de Qualidade de Água – QUALIÁGUA.
Concentração de saturação do oxigênio dissolvido nos corpos hídricos (ODsat _i)	Determinação da influência da temperatura ¹ , altitude ² e salinidade ¹	Popel (1979) e Qasim (1985) 1 – QUALIÁGUA; 2 – Google Earth Pro.
Coefficientes cinéticos de reação/ Correção em função da temperatura da água		Sperling (2007) e Chapra (2008).
Engenheiro Ávidos: Volumes máximo e mínimo – 293,60 e 40,60 hm ³		Notas técnicas Nº 73/2018/SGH – ANA e

São Gonçalo: Volumes máximo e mínimo – 29,90 e 2,04 hm ³		Nº 001/ 2019 – AESA
Vazões afluentes aos reservatórios e ao nó do sistema	Calculadas pelo modelo do tipo chuva-vazão SMAP mensal, com parâmetros obtidos já calibrados junto à estação fluviométrica de Piancó (37340000).	ANA (2016)
	Os dados de precipitação foram obtidos de postos pluviométricos próximos as áreas de interesse	Postos pluviométricos: Fazenda Timbaúba, Engenheiro Ávidos, São Gonçalo, Bonito de Santa Fé, Serra Grande, São José de Piranhas, Cajazeiras e Aguiar
	A evapotranspiração foi proveniente do banco de dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura – FAOCLIM	Estação climatológica de São Gonçalo

Verificação da representatividade da modelagem em relação à área de estudo e critérios operacionais

A representatividade dos procedimentos de modelagem para com o sistema estudado foi avaliada a partir de uma simulação com os dados de entrada da área de estudo, cujos resultados foram comparados com os dados qualitativos dos corpos hídricos fornecidos pela ANA (2016), entre 2004 e 2011, por meio do cálculo do erro relativo, conforme presente na Equação 16. Os dados de qualidade de água referem-se a DBO, OD, nitrogênio amoniacal e fósforo total. Sendo $CMvar_i$ a concentração da variável i medida e $CSvar_i$ a concentração da variável i obtida por meio da simulação matemática.

$$ER_i = \left| \frac{CMvar_i - CSvar_i}{CMvar_i} \right| * 100 \quad (16)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 (A e B) estão os volumes dos reservatórios nos dois Cenários. Os reservatórios permaneceram grande parte do tempo com volumes armazenados superiores à metade de suas capacidades totais, resultados que podem ser justificados pela não consideração do abastecimento urbano. Além do mais, níveis elevados de água nos reservatórios implicam em maior capacidade de diluir os efluentes lançados, fazendo com que as concentrações dos parâmetros como nitrogênio, fósforo e DBO permaneçam em níveis mais baixos.

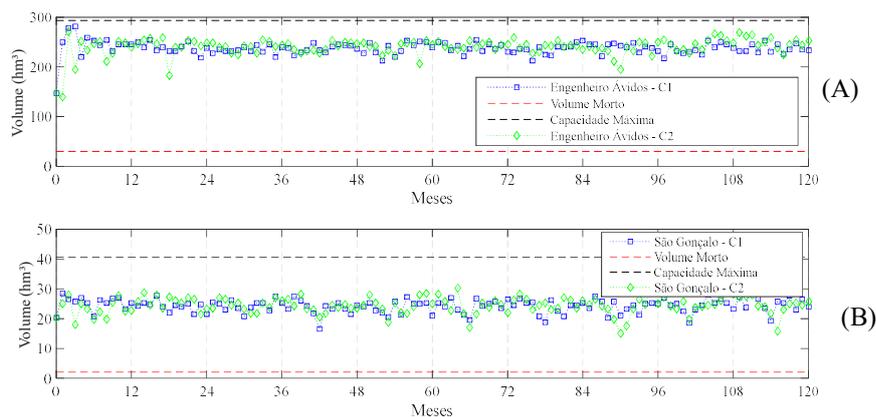


Figura 2: Volume dos reservatórios Engenheiro Ávidos (A) e São Gonçalo (B) para o período otimizado.

As concentrações de DBO e de OD para os reservatórios e o nó, nos dois Cenários, podem ser visualizadas na Figura 3 (A, B, C, D, E e F), com valores dentro dos limites definidos pela legislação. Além da ausência de demandas a serem atendidas, que poderiam reduzir os níveis dos reservatórios, Engenheiro Ávidos possui maior capacidade de armazenamento e a ele é computada apenas uma carga de efluente, o que favorece a conversão do material orgânico sem reduzir significativamente as concentrações de OD,

inclusive quando efluentes brutos são lançados (Cenário 1).

Mesmo sendo de menor capacidade de armazenamento e estando sujeito à maior carga de efluentes, o reservatório São Gonçalo possui dependência da contribuição proveniente do reservatório Engenheiro Ávidos, este, por sua vez, conduziu vazões que auxiliaram na diluição dos efluentes em seções a jusante.

O nó considerado no sistema é um ponto crítico, já que ocorre a mistura entre o rio e demais contribuições. Em todos os 120 meses, o atendimento às demandas qualitativas não falhou, desta forma, é possível afirmar que em todo o trajeto do segundo trecho do rio Piranhas, até a entrada no reservatório São Gonçalo, os valores respeitaram os limites definidos pelo CONAMA, já que não são inseridas novas cargas até o reservatório São Gonçalo.

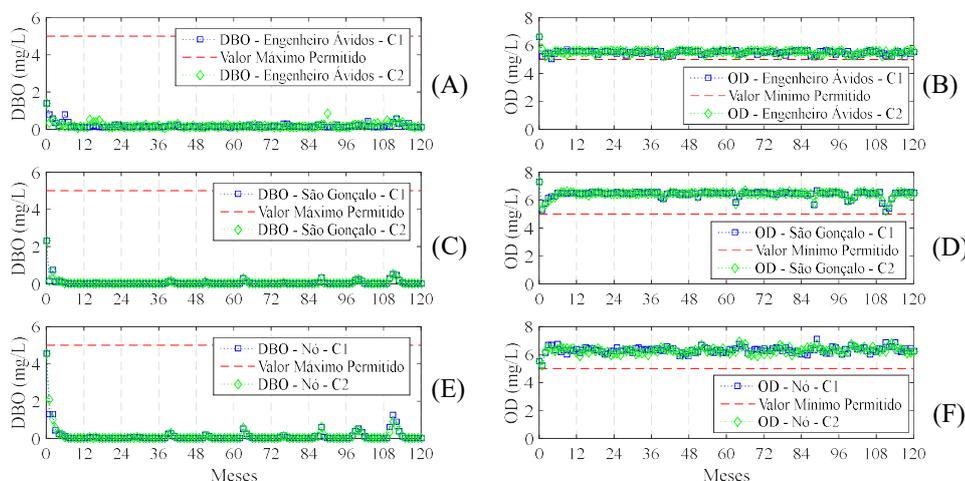


Figura 3: Concentrações de DBO e OD para os reservatórios e o nó do sistema.

Em elevadas concentrações, a amônia e o nitrato podem apresentar caráter tóxico para os organismos aquáticos (JONH et al., 2020), além de estarem diretamente relacionados ao processo de eutrofização cultural, que, em estágios mais avançados, pode comprometer os recursos hídricos (SHAFIEI, 2020). As concentrações das formas nitrogenadas para os reservatórios e o nó, nos dois Cenários, encontram-se na Figura 4 (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K e L). Os níveis de nitrogênio amoniacal e de nitrato permaneceram abaixo dos limites estabelecidos pelo CONAMA para águas de classe 2.

Segundo Musungu et al. (2013), sistemas convencionais de lagoas de estabilização geralmente possuem baixa eficiência na remoção de nutrientes. Assim, a rotina de otimização, para proporcionar adequação também dos níveis de nitrogênio e fósforo, elevou o volume dos reservatórios para que a capacidade de assimilação dos corpos hídricos aumentasse, fato este que pode justificar volumes similares dos reservatórios nos dois Cenários (Figura 2).

Reservatórios de montante têm grande importância no controle qualitativo dos corpos hídricos a jusante, permitindo a condução de vazões para que ocorra diluição de efluentes (ALAE et al., 2020; SOKOLOV, 2018). Como uma das vazões de entrada no nó é proveniente do reservatório de montante Engenheiro Ávidos, as contribuições do mesmo favoreceram a melhor qualidade das águas nos trechos do rio Piranhas.

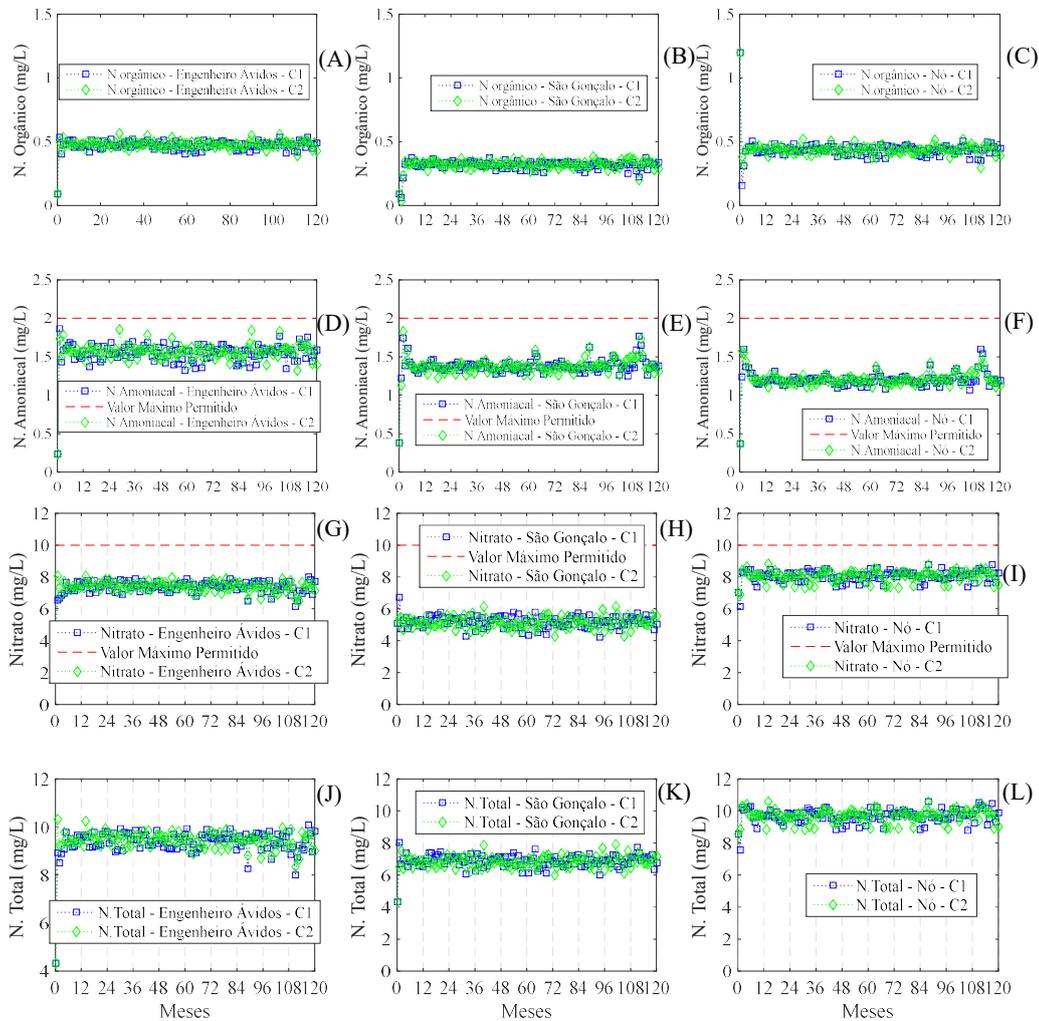


Figura 4: Concentrações das formas nitrogenadas para os reservatórios e o nó do sistema.

Assim como para os demais parâmetros estudados, os limites de fósforo total nos reservatórios e nó também foram mantidos em valores aceitáveis pela legislação, conforme presente na Figura 5 (A, B, C, D, E, F, G, H e I). O fósforo geralmente é o fator limitante quando o processo de eutrofização está sendo estudado em ambientes lânticos (KUMAR et al., 2019), desta forma, a otimização qualitativa pôde estabelecer condições em que as concentrações de todos os parâmetros avaliados permanecessem em níveis aceitáveis nos reservatórios.

As contribuições das vazões do reservatório Engenheiro Ávidos permitiram que, em nenhum mês, fossem observadas ausência de vazões no leito do rio, auxiliando na diluição dos efluentes em todos os meses de operação do sistema. No entanto, Segundo Albuquerque et al., (2019) e López et al., (2020), rios intermitentes, o que muitas vezes é a realidade do rio Piranhas, estão mais vulneráveis à ação antrópica, já que em períodos de seca ou consumo total das disponibilidades hídricas não haverá diluição dos efluentes.

Representatividade do modelo para a área de estudo

Os resultados da determinação dos erros relativos para os parâmetros de qualidade de água estudados estão presentes na Tabela 1, na forma de valores médios e máximos. Em termos médios, os erros relativos calculados permaneceram abaixo de 9%, resultados que evidenciam a representatividade e

aplicabilidade da metodologia proposta na Área de Estudo, uma vez que as concentrações determinadas foram próximas aos valores medidos.

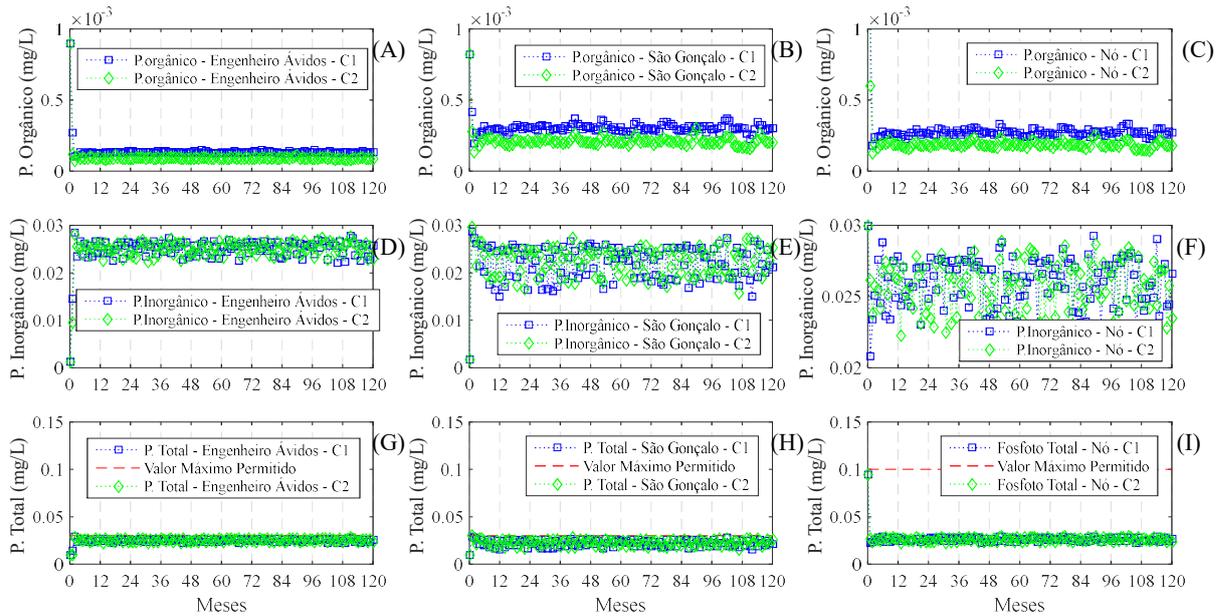


Figura 5: Concentrações das formas fosfatadas para os reservatórios e nó no trecho do rio Piranhas.

Tabela 1: Valores médios e máximos para o erro relativo correspondente às concentrações de nitrogênio e fósforo dos reservatórios.

Parâmetro	Reservatório	Erro médio (%)	Erro máximo (%)
DBO	Engenheiro Ávidos	2,41	7,05
	São Gonçalo	3,12	6,35
OD	Engenheiro Ávidos	4,41	8,35
	São Gonçalo	6,00	8,74
Nitrogênio Amoniacal	Engenheiro Ávidos	3,22	5,98
	São Gonçalo	1,47	4,72
Fosforo Total	Engenheiro Ávidos	3,60	7,81
	São Gonçalo	5,37	8,52

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da otimização no sistema de Recursos hídricos estudado, foi observado que durante todo o período de operação as concentrações dos parâmetros de qualidade de água mantiveram-se em níveis aceitáveis para a classe 2, nos dois Cenários, incluindo o reservatório São Gonçalo, que possui menor capacidade de armazenamento e mais cargas de efluentes sendo lançadas diretamente ou indiretamente.

A representatividade da metodologia para com a área de estudo também pôde ser verificada, com concentrações calculadas próximas às medidas nos corpos hídricos, o que torna efetiva a aplicabilidade da rotina de cálculo no sistema de recursos hídricos, podendo auxiliar, desta forma, no suporte à tomada de decisões. Agradecimentos à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba - FAPESQ, pelo apoio financeiro fornecido ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ABDEL, M. B.. A novel method for solving the fully neutrosophic linear programming problems. *Neural Computing and Applications*, v.31, n.5, p.1595-1605, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3404-6>

ABDULBAKI, D.. An optimization model for the allocation of

water resources, *Journal of Cleaner Production*, v.164, p994-1006, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.024>

ALBUQUERQUE, M. T. D.. Impacto da previsão de descargas de efluentes de esgoto usando QUAL2Kw em uma área

protegida sensível: Portugal, **SN Applied Sciences**, v.1, n.10, p.1167, 2019.

ALAE, E. N.; PASCALE, C.; BERNARD, A.. Remediação da poluição acidental de rios: estratégias baseadas no uso de reservatórios, **IFAC Papers**, v.53, n.2, p.16605-16610, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.788>

ARTHUR, J. P.. **Notes on the Design and operation of Waste Stabilization ponds in Warm Climates of Developing Countries**. Washington: World Bank, 1983.

BABAMIRI, O.; MAROFI, S.. Uma abordagem de otimização de simulação multi-objetivo para o planejamento de recursos hídricos de sistemas rio-reservatório com base em um modelo acoplado quantidade-qualidade, **Ciências Ambientais da Terra**, v.80, n.11, p.389, 2021.

BOAH, D. K.; TWUM, S. B.. A Review of Water Quality Optimisation Models and Techniques, **Journal of Applied Mathematics and Physics**, v.8, n. 3, p. 424-433, 2020.

BRASIL. **Nota Técnica nº 11/2018/COMAR/SER**. Brasília: ANA, 2018.

BRASIL. **Nota Técnica nº 73/2018/SGH**. Brasília: ANA, 2018.

BRASIL. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú**: Resumo executivo. Brasília: ANA, 2016.

BRASIL. **Resolução 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: MMA, 2005.

BRASIL. **Resolução 91/2008 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA)**. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Brasília: MMA, 2008.

CASSIOLATO, G.. Optimization of water distribution networks using a deterministic approach, **Engineering Optimization**, v.53, n.1, p.107-124, 2021.

CHAPRA, S. C.. **Métodos numéricos para engenharia**. São Paulo: McGraw-hill, 2008.

CIRILO, J. A.. Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L.. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002, p. 305-359.

DEREPASKO, D.. Considerando a escala nos procedimentos de otimização para as decisões de gestão da água: Balanceando fluxos ambientais e necessidades humanas, **Modelagem Ambiental e Software**, v.139, p.104991, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104991>

FU, B.. Uma revisão dos modelos de erosão e qualidade da água em escala de bacia hidrográfica e uma síntese das perspectivas futuras, **Environmental Modeling & Software**, v.114, p.75-97, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.008>

KAMALI, A.; NIKSOKHAN, M. H.. Otimização multi-objetivo para gestão sustentável de águas subterrâneas através do desenvolvimento de modelo de otimização de simulação de qualidade e quantidade acoplada, **Journal of Hydroinformatics**, v.19, n.6, p.973-992, 2017.

KUMAR, P.; MAHAJAN, A. K.; MEENA, N. K.. Evaluation of trophic status and its limiting factors in the Renuka Lake of Lesser Himalaya, India, **Environmental Monitoring and Assessment**, v.191, n.2, p.105, 2019

MARTINSEN, G.. Otimização conjunta da alocação da água e gestão da qualidade da água na bacia do rio Haihe, **Science of The Total Environment**, v.654, p.72-84, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.036>

MUSUNGU, C. P.. A extensão da remoção de nutrientes por estações de tratamento de águas residuais ao longo do córrego Nyalenda Wigwa e do rio Kisat (Quênia), **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.13, n.4, p.236-240, 2013.

OLIVEIRA, A. A.; LIMA, I. E. N.. Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI), **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.1, p.3-14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017142354>

HAN, Q.. Influências antropogênicas na qualidade da água do Lago Baiyangdian no norte da China na última década, **Science of The Total Environment**, v.701, p.134929, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134929>

JOHN, E. M.; KRISHNAPRIYA, K.; SANKAR, T. V.. Treatment of ammonia and nitrite in aquaculture wastewater by an assembled bacterial consortium, **Aquaculture**, v.526, p.735390, 2020.

LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.. Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.3, p.5-22. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n3.p5-22>.

LIANG, Z.. Simular a capacidade de previsão de um modelo de qualidade de água complicado usando a abordagem de memória de curto prazo longo, **Journal of Hydrology**, v.581, p.124432, 2020.

LIMA, B. P.; MAMEDE, G. L.; LIMA, I. E. N.. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida, **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.1, p.125-135, 2018.

LÓPEZ, E.. Avaliação da qualidade da água e risco ecológico do fluxo intermitente através da mineração e áreas urbanas da sub-bacia do Rio San Marcos, México. **Nanotecnologia Ambiental, Monitoramento e Gestão**, v.14, p.100369, 2020.

ORTEGA, P.; PIRES, N.; LIMA, C.. O Critério de Euler como Ferramenta para o Estudo e Diferenciação Entre Funções de Estado e Variáveis de Processo em Termodinâmica Química, **Química Nova**, v.2018, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170234>

PARAÍBA. **Nota técnica AESA/GEMOH**: 001/2019. Campina Grande: AESA, 2019.

POPEL, H. J.. **Aeration and gas transfer**. 2 ed. Delft: Delft University of Technology, 1979.

QASIM, S. R.. **Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation**. New York: Hot, Rinehart and Winston, 1985.

SANTOS, V.. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, n.4, p.49-60, 2011. DOI:

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p49-60>

SHAFIEI, F.. Balanço de massa de nutrientes de um grande reservatório ribeirinho no contexto da variabilidade do tempo de residência da água, **Environmental Science and Pollution Research**, v.28, n.29, p.39082-39100, 2021.

SIVAPURAM, R.; PICELLI, R.. Topology optimization of binary structures using Integer Linear Programming, **Finite Elements in Analysis and Design**, v.139, p.49-61, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.10.006>

SOKOLOV, A. K.. Determinação da Taxa Mínima de Fluxo de Água Requerida para Diluir Águas Residuais antes de Sua Descarga, Levando em Conta a Soma de Efeitos de Substâncias Nocivas, **Engenharia Térmica**, v.65, n.10, p.768-774, 2018.

SPERLING, M.. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

SPERLING, M.. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

VALCARCEL, L. R.. Qualidade e situação da gestão do abastecimento de água potável em uma região semiárida do Nordeste do Brasil, **Revista de Ciências Ambientais e Saúde, Parte A**, v.55, n.10, p.1247-1256, 2020.

VALIALLAHI, J.; KHAFFAF, S. R.. Aplicação de técnicas estatísticas multivariadas para investigar mudanças climáticas e efeitos antropogênicos na avaliação da qualidade da água de superfície: estudo de caso do rio Zohreh, Hendijan, Irã. **Applied Water Science**, v.11, n.6, p.99, 2021.

VEINTIMILLA, J. R.. A linear programming approach to optimise the management of water in dammed river systems for meeting demands and preventing floods, **Water Supply**, v.18, n.2, p.713-722, 2018.

ZHANG, C.; GUO, P.. An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement, **Ecological Indicators**, v.92, p.342-353, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.018>

ZHOU, Y.. Robust Linear Programming and Its Application to Water and Environmental Decision-Making under Uncertainty, **Sustainability**, v.11, n.1, p.33, 2018. DOI:

<https://doi.org/3390/su11010033>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157795607220322305/>