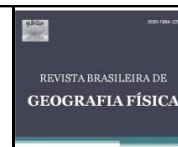




ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Análise da variação temporal da carga de fósforo no baixo Rio São Francisco (AL/SE)

Rogério da Silva Santos¹, Paulo Ricardo Petter Medeiro², Everson de Oliveira Santos³

Rogério da Silva Santos. rogeriogeographia@gmail.com (autor correspondente) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA).

Paulo Ricardo Petter Medeiros. Professor Titular da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), no Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA). Everson de Oliveira Santos. Universidade Federal de Alagoas (UFAL) / Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA).

Artigo recebido em 12/07/2021 e aceito em 26/03/2022.

RESUMO

A construção de barragens para geração de energia hidroelétrica causou alterações nas condições naturais dos setores Sub-médio e Baixo São Francisco, formando uma cascata de barragens e reservatórios ao longo do eixo principal do rio. O presente trabalho avaliou a carga de fósforo ortofosfato no baixo rio São Francisco AL/SE – Brasil, durante os anos de 2008, 2009 e 2010. A área estudada encontra-se a latitude 10°12' S e longitude 36°49' W, 80 km a montante da foz e 100 km a jusante da Usina Hidrelétrica de Xingó, área da ponte rodoferroviária entre os municípios de Porto Real do Colégio-AL e Propriá-SE. As amostras foram coletadas em uma estação próxima a ponte rodoferroviária entre as cidades de Propriá (SE) e Porto Real do Colégio (AL). Neste estudo o fósforo inorgânico dissolvido (PID) pode ser considerado baixo quando comparado com outros rios tropicais. Após a conclusão da cascata de barragens e a regulação do fluxo dos rios após 1995, as cargas específicas de PID diminuíram a níveis abaixo de rios tropicais que já possuíam cargas específicas mais baixas. A comparação das cargas específicas de PID do RSF com outros rios tropicais mostram que diferenças de gradiente, tamanho, cobertura vegetal e obras de engenharia tiveram efeitos diferentes sobre as cargas específicas de nutrientes.

Palavras-chave: vazão; yield; ortofosfato.

Analysis of the temporal variation of phosphorus load in the lower São Francisco River (AL/SE)

ABSTRACT

The construction of dams for hydroelectric power generation caused changes in the natural conditions of the Submedia and Baixo São Francisco sectors, forming a cascade of dams and reservoirs along the main axis of the river. The present work evaluated the load of phosphorus orthophosphate in the lower São Francisco River AL / SE - Brazil, during the years 2008, 2009 and 2010. The studied area is located at latitude 10 ° 12 'S and longitude 36 ° 49' W , 80 km upstream of the mouth and 100 km downstream of the Xingó Hydroelectric Plant, an area of the railroad bridge between the municipalities of Porto Real do Colégio-AL and Propriá-SE. How they were collected at a station near the railroad bridge between the cities of Propriá (SE) and Porto Real do Colégio (AL). In this study, dissolved inorganic phosphorus (PID) can be considered low when compared to other tropical rivers. After the completion of the cascade of dams and the regulation of river flow after 1995, specific PID loads decreased to levels below tropical rivers that already had lower specific loads. The comparison of RSF's PID loads with other rivers determined that difference in gradient, size, vegetation cover and engineering works have different effects on specific nutrient loads.

Keywords: flow rate; yield; orthophosphate.

Introdução

Rios possuem regime variável, em algumas regiões do planeta se torna crítico o abastecimento em períodos de estiagem (Santos, 2020). Com isso são construídos reservatórios, com o objetivo de armazenar água durante a estação chuvosa, formando uma reserva hídrica

para a estação seca. As bacias hidrográficas se mostram altamente vulneráveis às atividades antrópicas, estas sofrem com a intensa exploração dos recursos naturais, através do desmatamento das vegetações nativas e lançamento de esgotos sem tratamento nos corpos hídricos (Costa e Ojima, 2020; Santos, 2021; Passos *et al*, 2021). Essas

práticas causam problemas ao meio natural e provocam prejuízos diretos às populações, tornando disponível água de baixa qualidade (Bifano *et al*, 2020; Okumura *et al*, 2020; Fraga *et al*, 2021). Por conta disso, atualmente ocorrem pressões sociais decorrentes do processo de autoconsciência da importância de se fazer uso da água como um bem, não como mero recurso econômico (Correia e Castilho, 2019).

Há no curso principal do Rio São Francisco diversas obras de engenharia voltadas para a geração de energia elétrica, ao abastecimento d'água, a navegação e à proteção contra enchentes, destacando-se as barragens, que alteram o regime hidrológico do rio, modificando a vazão líquida e sólida à jusante, devido o fato de reter grande parte dos sedimentos (Silva e Aras, 2020). No Brasil são construídas barragens em muitos rios para abastecimento de populações, irrigação de terras e, principalmente, produção de eletricidade, da qual as sociedades humanas são altamente dependentes (Schmidt, 2020). A energia proveniente de hidrelétricas contribui com mais de 60% para o total de energia gerada no país (EPE, 2021). Por depender fortemente das hidrelétricas, a geração de energia está sujeita a variações na oferta, pois o insumo das usinas é a vazão dos rios, variável dependente do clima, do uso e tipo do solo, precipitação entre outros fatores (Ribeiro *et al*, 2021). O país possui um elevado potencial hidroelétrico (213.000 megawatts) tendo como potencial instalado 133.977 megawatts (Cunha e Guerra, 2006).

O impacto de barragens provocado ao meio ambiente é assunto de grande relevância, pois estas provocam alterações físicas, químicas e biológicas na água e nos sedimentos armazenados nos seus reservatórios, com isso, influenciando processos hidrológicos e biogeoquímicos nos rios, estuários e ecossistemas costeiros. Estudos mostram que as atividades humanas e as mudanças globais são importantes fatores que influenciam os fluxos de sedimentos, sendo a construção de barragens considerada a principal causa da redução dos fluxos de sedimentos para o oceano (Medeiros *et al*, 2014).

A construção de barragens para geração de energia hidroelétrica causou alterações nas condições naturais dos setores Sub-médio e Baixo São Francisco (Medeiros *et al*, 2011), formando uma cascata de barragens e reservatórios ao longo

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

do eixo principal do rio. As barragens construídas provocaram modificações nas vazões e no aporte de matéria em suspensão no Sub-médio e Baixo RSF (Medeiros *et al*, 2007).

A matéria em suspensão, destacando o fósforo, pode atuar como regulador da produtividade primária aquática em águas continentais, regiões tropicais, subtropicais e temperadas, contribuindo em processos como armazenamento de energia, para estruturação da membrana celular, transferência de informação genética e metabolismo celular, processos esses fundamentais para os seres vivos (Esteves e Panoso, 2011). Em razão dessas características, entende-se que o fósforo é responsável pela eutrofização artificial nos ambientes (Costa e Ojima, 2020).

O fosfato total (P-total) e o ortofosfato (P-orto) são importantes compostos de fósforo. O P-total pode indicar o nível de trofia de um ambiente, enquanto o P-orto é conhecido como a principal forma de fosfato assimilada por vegetais aquáticos, microalgas e bactérias (Esteves e Panoso, 2011). O fosfato pode ter origem em fontes naturais, como rochas em ecossistemas continentais, e fontes artificiais (Papera, 2021).

O fosfato de origem natural está presente em minerais primários das rochas da bacia hidrográfica, 95% desse total está contido no mineral apatita (Cavalcanti, 2021). O fosfato é liberado por intemperismo, carregado por escoamento das águas superficiais e assim chega a diferentes ecossistemas nas formas solúvel e adsorvido às argilas (Esteves e Panoso, 2011). Outras maneiras de aporte de fosfato são a precipitação atmosférica e deposição do material particulado.

As fontes artificiais de fosfato são maiores em grandes áreas industrializadas, com grande contingente populacional. A quantidade de fósforo, oriunda de fontes antrópicas podem superar os valores naturais, pois este é um elemento presente de forma universal em vários efluentes onde ocorrem atividades humanas (Costa e Ojima, 2020; Santos *et al*, 2021). A contribuição per capita diária de fósforo no Brasil, depositada em ambientes aquáticos é estimada entre 0,7 e 2,5 g (Von Sperling, 2005). Em virtude disso, este trabalho tem por objetivo analisar os níveis de fósforo ortofosfato no rio São Francisco para os anos de 2008, 2009 e 2010.

O rio São Francisco nasce no Estado de Minas Gerais, a 1.800 metros de altitude. Possui

2.863 km de extensão, 639.219 km² de área e corresponde a 7,5% do território Nacional (ANA, 2015). Deságua entre os Estados de Alagoas e Sergipe em latitude 10°36' S e longitude 36°23' W, onde a profundidade média é 14 metros (Medeiros et al., 2007). Está dividido em quatro setores: Alto, Médio, Sub-médio e Baixo São Francisco.

O setor do Baixo São Francisco estende-se de Paulo Afonso (BA) até a foz, entre Piaçabuçu (AL) e Brejo Grande (SE), uma área total de 30.337 km², equivalente a 5% do total da área da bacia, a menor área das quatro subdivisões (Figura 1). O leito do rio corre encaixado em um cânion formado por rochas ígneas e metamórficas do pré-cambriano, indo até a cidade de Pão de Açúcar (AL). A partir daí o vale se alarga conforme se aproxima do litoral, percorre terrenos quaternários formados por depósitos aluviais e litorâneos com feição de formação deltaica (Cunha, 2007).

A área estudada encontra-se a latitude 10°12' S e longitude 36°49' W, a 80 km a montante da foz e 100 km a jusante da Usina Hidrelétrica de Xingó, área da ponte rodoferroviária entre os municípios de Porto Real do Colégio-AL e Propriá-SE.

Os setores são caracterizados, devido à extensão da bacia, por diferentes domínios climáticos. De acordo com a classificação de Köppen, clima tropical úmido do tipo Aw no Alto; do tipo Aw à BShw no Médio; tipo semiárido BShw no Sub-Médio, e do tipo AS, quente e úmido, no Baixo (Bernardes, 1951).

A precipitação total anual no Baixo São Francisco varia de 1.250 mm a 1.500 mm, o período de maior pluviosidade em seu baixo curso é nos meses de maio a julho, sendo a temperatura média anual de 24° C (Nimer, 1972). Metade da região recebe menos de 750 mm e algumas áreas centrais menos de 500 mm (Prado, 2003).

A geologia sedimentar é composta por cordões montanhosos do Cretáceo, Formação Barreiras do Terciário e aluviões e dunas do Quaternário. Ponte (1969) identificou três províncias geomorfológicas com características semelhantes à planície costeira do rio São Francisco. A área de relevo ondulado está relacionada às rochas pré-Cambrianas dos grupos Baixo São Francisco e Sergipe, nas quais as diferenças litológicas são responsáveis pelas variações na morfologia do terreno.

Tabuleiros Terciários da Formação Barreiras deram origem a uma superfície plana e pouco dissecada integrando a maior parte dos sedimentos do Sub-Médio e Baixo Rio São Francisco. A Planície Quaternária é formada por depósitos de origem marinha, lacustre e eólica, concentrando-se na região do delta estuarino. Formada por superfícies planas, praticamente sem desníveis acentuados, composta por sedimentos recentes, aluvionares, dunas eólicas e praias (Medeiros et al., 2014).

Metodologia

O presente trabalho foi elaborado com a utilização de dados do Laboratório de Geoquímica Ambiental (IGDEMA/UFAL). Foram analisados dados coletados nos anos de 2008, 2009 e 2010 com periodicidade mensal, visando determinar a carga de fósforo.

As amostras foram coletadas (Figura 1) em uma estação próxima a ponte rodoferroviária entre as cidades de Propriá (SE) e Porto Real do Colégio (AL) (Lat. 10°12'S e Long. 36°49'W). A estação está localizada 80 km à montante da foz do rio São Francisco e 100 km à jusante da Usina Hidrelétrica de Xingó.



Figura 1. Localização da área de estudo e estações de amostragem no setor inferior do rio São Francisco. Fonte: Google Earth (2019).

As amostras foram coletadas com garrafa tipo Van Dorn, em acrílico, em sub-superfície, em torno de 20 centímetros abaixo da linha de água.

Análise em laboratório

O fósforo orto foi determinado segundo Carmouze (1994). A determinação do fluxo de material em suspensão e nutrientes foi segundo Medeiros et al. (2007).

$$F_m = Q C_i$$

Onde:

F_m = fluxo momentâneo dos nutrientes ou material em suspensão i;

Q = vazão (m^3/s);

C_i = concentração do material em suspensão ou nutrientes.

Determinado o fluxo momentâneo (F_m) do material m, foram estimadas as cargas diárias do fósforo (Q_m), onde Q_m é a carga diária expressa em toneladas. A carga total mensal foi obtida pela multiplicação da carga diária (Q_m) pelo número de dias do mês em questão.

A vazão utilizada foi obtida com o uso da plataforma HidroWeb (Estação 49705000 - Propriá). Os gráficos e tabelas foram feitos com o uso do programa Microsoft Office Excel.

Resultados e discussão

Pluviosidade

A região apresenta ciclos de fortes estiagens, secas prolongadas e alto potencial de evaporação da água (Ferreira, 2019). De acordo com Medeiros et al. (2011) e Medeiros et al. (2016), a localização geográfica da precipitação nas porções inferiores é mais importante para o fluxo de matéria particulada suspensa e nutrientes do que a magnitude da precipitação, assim como a vazão gerada por essas precipitações. Isso decore da menor retenção de matéria pelo sistema de barragens em cascata em razão da precipitação se dar em porções mais inferiores da bacia. Esta precipitação (com baixas médias anuais) que ocorre na região semiárida, onde os solos são rasos e o embasamento cristalino é perto da superfície, dificulta a infiltração, incrementa a lixiviação e erosão, resultando no maior carreamento de nutrientes (Cavalcanti, 2021). Em razão disso, nesse trabalho será avaliada a precipitação nos setores submédio e baixo SF.

Os valores de precipitação no submédio São Francisco foram obtidos da estação pluviométrica 00940024, em Juazeiro-BA. Nos anos hidrológicos analisados (Figura 2) foram observados valores diferenciados, com baixas precipitações entre os meses de maio a novembro. A região em questão está localizada no semiárido, caracterizada por baixo índice pluviométrico, chuvas irregulares e escassas. Trata-se de um

território vulnerável e sujeito a períodos críticos e de prolongadas estiagens, com várias zonas geográficas e diferentes índices de aridez.

O ano que apresentou maior média de pluviosidade foi 2008, com 52,85 mm, com grandes precipitações mensais nos meses de janeiro, fevereiro e notavelmente no mês de março (Figura 2). A menor média ocorreu em 2010, 33,23 mm. Os meses mais chuvosos foram de dezembro a abril, entre maio e novembro ocorreram valores abaixo do período anterior.

Os dados de precipitação do setor Baixo São Francisco foram obtidos na estação 00937022, localizada em Piranhas-AL. Analisando os dados (Figura 3) se percebe que essa região apresenta comportamento diferente do sub-médio em todos os anos hidrológicos analisados. As médias anuais mostram que no baixo RSF, nos anos de 2008, 2009 e 2010 ocorreram maiores precipitações médias em relação ao sub-médio RSF.

As médias anuais analisadas

demonstraram que as precipitações médias do baixo SF foram significativamente maiores em comparação com o sub-médio SF. O ano de 2008 registrou valores médios de 52,85 mm no SMSF e 67,6 mm no BSF. Para 2009 ocorreram 43,23 mm no SMSF e 92,48 mm no BSF. No ano de 2010 a precipitação foi de 33,23 mm no SMSF e 77,2 mm no BSF.

O ano que apresentou maior média de pluviosidade foi 2009, com 92,48 mm. A menor média ocorreu em 2008, 67,6 mm. Os meses mais chuvosos foram de abril a agosto, entre setembro e março ocorreram valores menores.

Em comparação com o estudo de Silva (2018), os anos analisados apresentaram maior índice de pluviosidade que o ano de 2001, o qual conforme Medeiros et al. (2011) foi um ano com precipitações abaixo das normais climatológicas, o que levou os reservatórios das hidrelétricas a ficar com níveis críticos, levando a uma crise de energia elétrica.

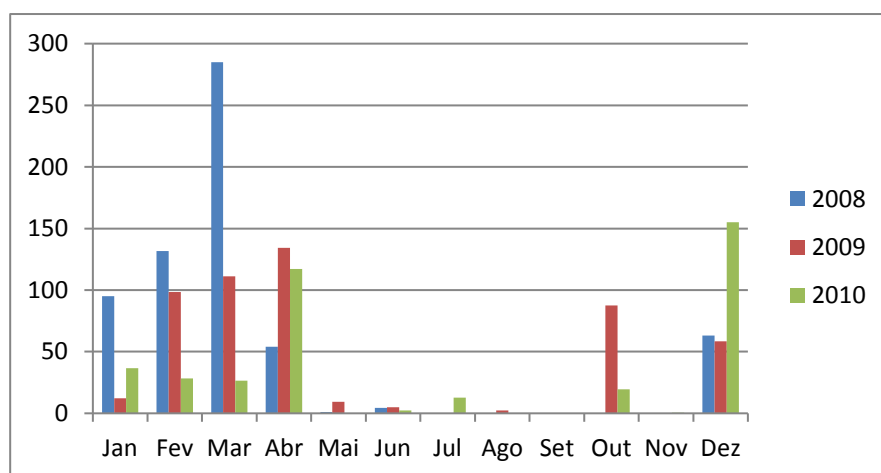


Figura 2. Precipitação no Sub-médio RSF para os anos de 2008, 2009 e 2010. Elaboração: Autores (2020). Fonte: ANA (2010).

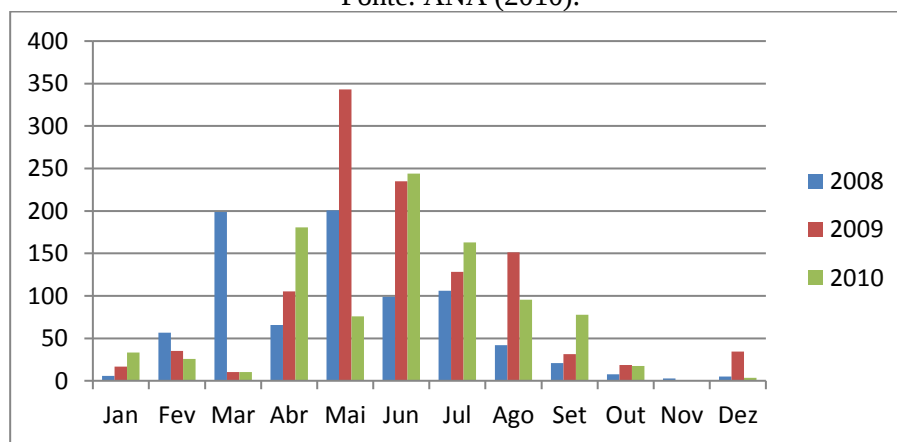


Figura 3. Precipitação no Baixo RSF para os anos de 2008, 2009 e 2010. Elaboração: Autores (2020). Fonte: ANA (2010).

Vazões

O Rio São Francisco é o maior rio totalmente situado em território nacional, escoando superficialmente por 2.700 km entre a nascente, na Serra da Canastra (MG), à foz, entre Sergipe (SE) e Alagoas (AL) (Pires, 2019). Banha ao todo 507 municípios nos quatro trechos, Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Koga, 2019; CBHSF, 2022), com população estimada em 20.330.051 habitantes (Codevasf, 2022; IBGE, 2022). Nos últimos 30 anos, o Rio São Francisco, com destaque para a região de seu estuário, passou a ter grande redução na descarga de água doce e no aporte de material em suspensão. Este sofreu vários impactos ligados ao sistema de barragens em cascata ao longo de seu curso, esses impactos são perceptíveis em outros rios onde há barragens (Santos, 2020). Medeiros et al. (2007) afirma que estes impactos tiveram seu ápice em 1994, com a instalação da Usina Hidrelétrica de Xingó, que devido a operação em conjunto com as demais UHE's gerou um cerceamento significativo da variação sazonal das descargas de água.

Com o início das construções das barragens no curso principal do rio São Francisco passou a haver interferência na vazão natural do rio (m^3/s). Entre os anos de 1938 e 1973 as vazões variaram entre $3008 \text{ m}^3/\text{s} \pm 850 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 1).

Entre 1938-1973 ocorreu a construção da UHE de Três Marias em 1963 no Alto SF, não afetou de forma expressiva a variabilidade temporal e a magnitude da vazão do Médio-Baixo

SF.

Em 1973, a CHESF iniciou a construção do reservatório de Sobradinho, no Sub-médio SF, o lago foi formado em 1979, com superfície de 4.214 km^2 , um dos maiores lagos artificiais do mundo, servindo como reservatório de regularização plurianual (Correia e Dias, 2003).

O período de 1977-1985 incorporou a conclusão das barragens de Apolônio Sales e Sobradinho, a última a montante da cascata. A vazão média do período foi $3136 \text{ m}^3/\text{s}$, a mínima identificada foi $1916 \text{ m}^3/\text{s}$, o máximo encontrado foi $4019 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo o desvio padrão $824 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão máxima foi menor que o período anterior, mas a média se manteve um pouco mais elevada.

De 1986-1994 foram incorporadas as barragens de Itaparica e Xingó, a última entrou em operação no final de 1994. Esse período apresenta valores menores que o anterior, a vazão média foi $2204 \text{ m}^3/\text{s}$, a mínima identificada foi $1498 \text{ m}^3/\text{s}$, o máximo encontrado foi $3779 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo o desvio padrão $749 \text{ m}^3/\text{s}$.

No período de 1995-2001 as barragens já estavam com vazão regularizada. Conforme Knoppers et al. (2005), estas reduções nas vazões tiveram seu ápice com a instalação da UHE Xingó, em 1994, que em operação conjunta com as demais UHE's promoveu uma redução significativa da variação sazonal das descargas de água. Todos os valores identificados neste período foram menores que em todos os anos anteriores (Tabela 1).

Tabela 1. média anual, desvio padrão, mínimos e máximos da vazão da estação fluviométrica de Traipú nos quatro estágios hidrológicos.

Estágio	Média (m^3/s)	Desvio padrão (m^3/s)	Mínimo (m^3/s)	Máximo (m^3/s)
1938-1973	3008	852	1768	5244
1977-1985	3136	824	1916	4019
1986-1994	2204	749	1498	3779
1995-2001	1758	235	1405	1980

Fonte: Medeiros et al. (2007).

Em anos posteriores a instalação das barragens, ocorreu redução das vazões anuais, entre os anos 1995 e 2001 as vazões médias reduziram-se de $3008 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1760 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 1).

Na Figura 4 é possível observar a variabilidade anual das vazões ocorridas no curso

principal do rio São Francisco nos períodos entre 1938-2010, na estação fluviométrica de Traipú (AL), localizada em torno de 40 km acima de Propriá (SE) (Medeiros et al., 2007).

Evidencia-se o decréscimo da variabilidade interanual e da magnitude da vazão

média anual ao longo do tempo.

O gráfico abaixo (Figura 5) mostra que o período de menor vazão no ano de 2008 foi de janeiro a março, com o valor mínimo de 1110,483 m³/s. Entre os meses de julho e dezembro houve maiores valores de vazão, atingindo 2401,492 m³/s no mês de novembro. A vazão média anual foi de 1678,126 m³/s.

O ano de 2009 registrou vazão média maior que o ano anterior, sendo de 2153,848 m³/s. O mês com menor vazão foi janeiro, com 1430,047 m³/s, o com maior valor foi maio, com 3108,146

m³/s. A partir de junho a vazão diminui, estando em 2455,56 m³/s e em dezembro apresenta 2182,073 m³/s.

O ano de 2010 apresentou vazão média de 1870,93 m³/s, estando abaixo de 2009 e acima de 2008. Entre janeiro e março os valores foram mais altos que entre abril e setembro, onde no primeiro período o maior valor foi 2121,458 m³/s e no seguinte foi setembro com 1810,668 m³/s. Entre outubro e dezembro ocorre um aumento da vazão, sendo dezembro o maior valor do período, 2183,924 m³/s.

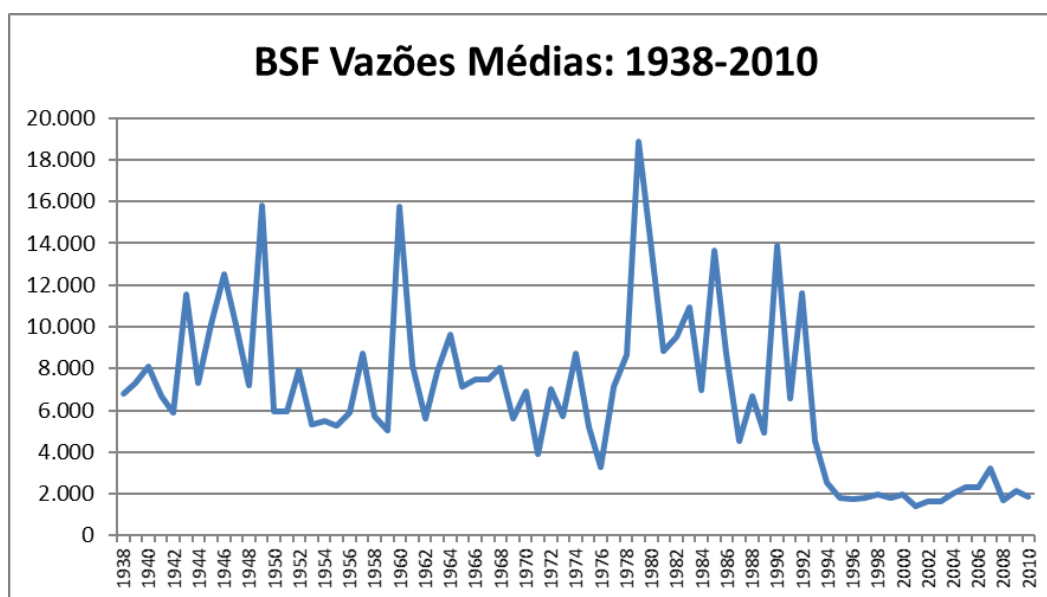


Figura 4. Vazões médias no Baixo São Francisco entre os anos de 1938-2010. Fonte: atual pesquisa. Elaboração: Autores (2020). Fonte: ANA (2019).

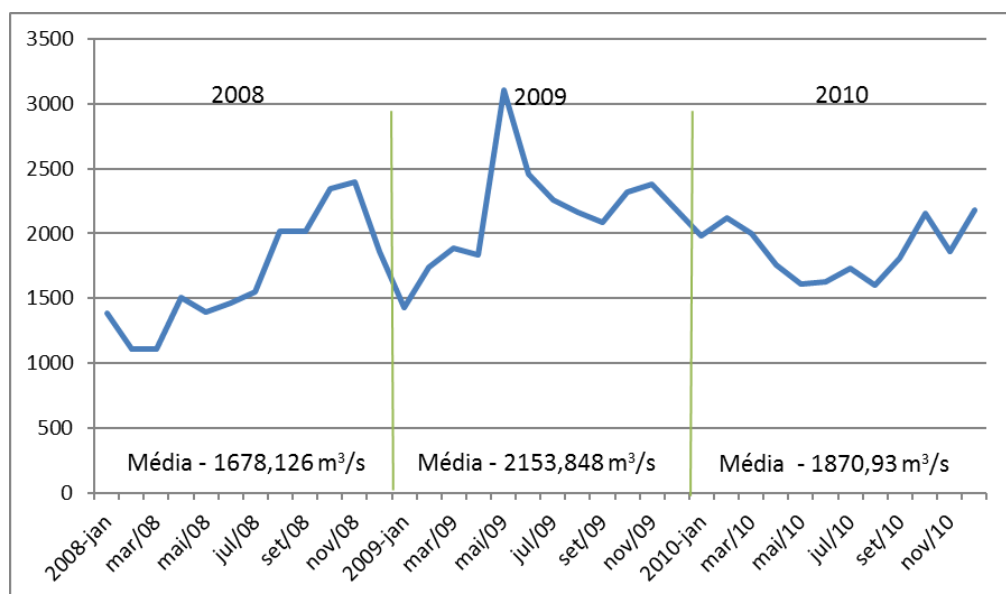


Figura 5. Vazão no Baixo Rio São Francisco para os anos 2008, 2009 e 2010. Fonte: atual pesquisa.

A Figura 5 mostra que após Xingó entrar em operação os eventos de cheias no baixo RSF são potencialmente reduzidos e regularizados (Knoppers et al., 2005). Em 2008 a vazão média foi de 1678,126 m³/s. Comparando as vazões médias dos quatro estágios hidrológicos definidos por Medeiros et al. (2007), com os valores encontrados nesta pesquisa para os anos de 2008, 2009 e 2010, é possível notar a redução de eventos extremos de mínimos e máximos de vazão.

Cargas de fósforo ortofosfato (PPO₄)

No ano de 2008 foram identificados maiores fluxos de fósforo ortofosfato para os meses de março (40,7206 ton.), abril (152,9451 ton), maio (57,3121 ton.), junho (47,1900 ton.) e dezembro (50,3408 ton.). Os meses com maiores vazões foram fevereiro (3907 m³/s), março (4594 m³/s),

abril (4953 m³/s), maio (2021 m³/s) e dezembro (2223 m³/s). As maiores precipitações ocorreram nos meses de março e maio (Figura 5). Observou-se que as cargas mensais de fósforo ortofosfato aumentaram conforme as vazões (Figura 7).

A Figura 6 mostra os valores mensais e a média anual obtida para as cargas de fósforo ortofosfato no ano hidrológico de 2009, no Rio São Francisco, onde os maiores valores encontrados ocorreram nos meses de maio (327,7611 ton.), junho (179,2470 ton.) e julho (172,8942 ton.), a média mensal foi de 86,4562 ton. As maiores vazões foram em janeiro (5393 m³/s), fevereiro (5051 m³/s), março (3668 m³/s) e abril (4440 m³/s). As maiores precipitações ocorreram nos meses de maio, junho, julho e agosto. Assim, para o ano de 2009, as cargas mais elevadas não ocorreram necessariamente nos meses de maiores vazões, mas nos de maiores precipitações (Figura 8).

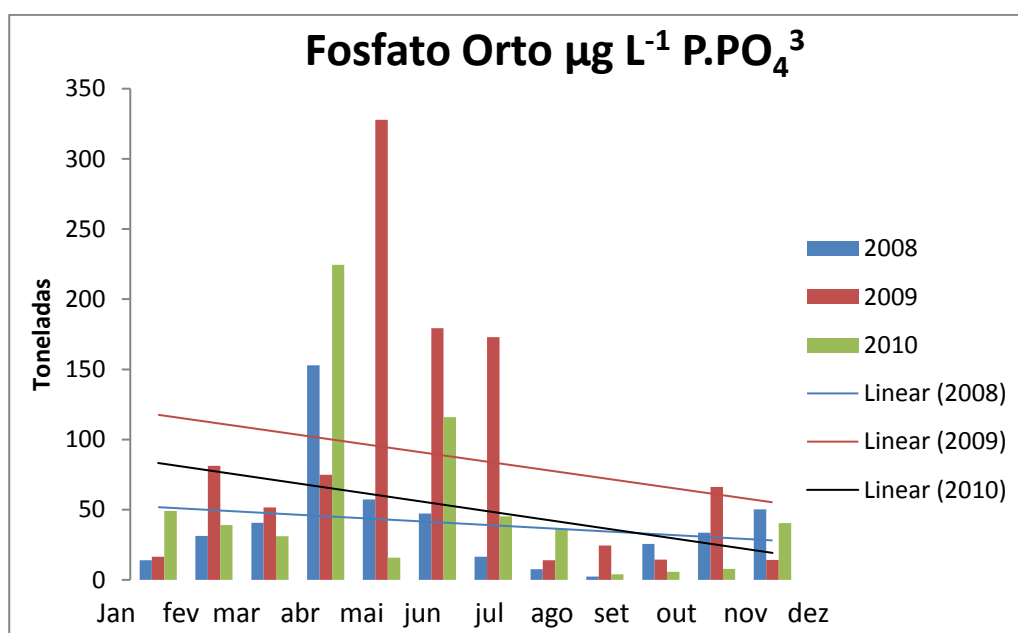


Figura 6. Comportamento do fluxo de fósforo ortofosfato no Rio São Francisco, nos anos hidrológicos de 2008, 2009 e 2010. Elaboração: Autores (2020). Fonte: LABMAR (2019).

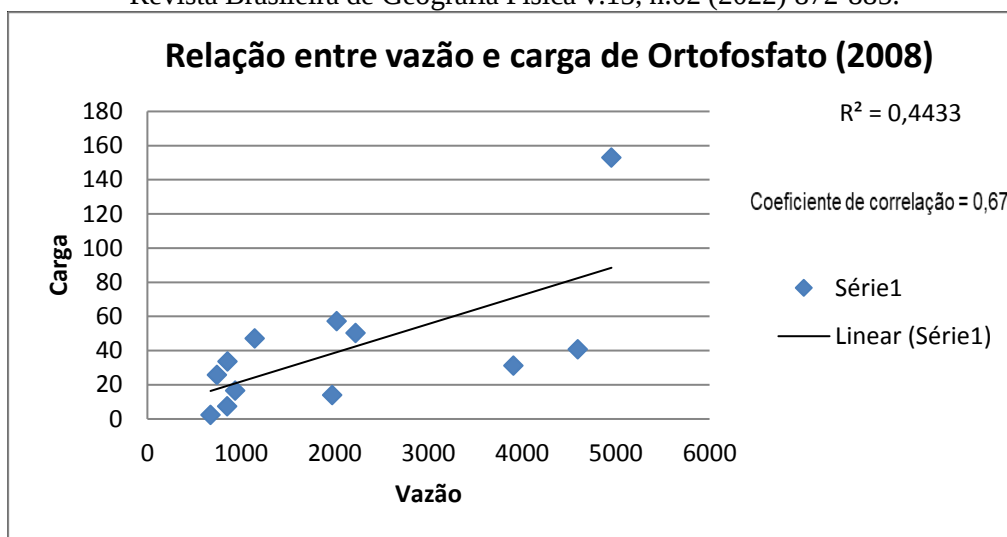


Figura 7. Relação entre vazão e carga de fósforo ortofosfato no RSF em 2008. Elaboração: Autores (2020).
Fonte: LABMAR (2019).

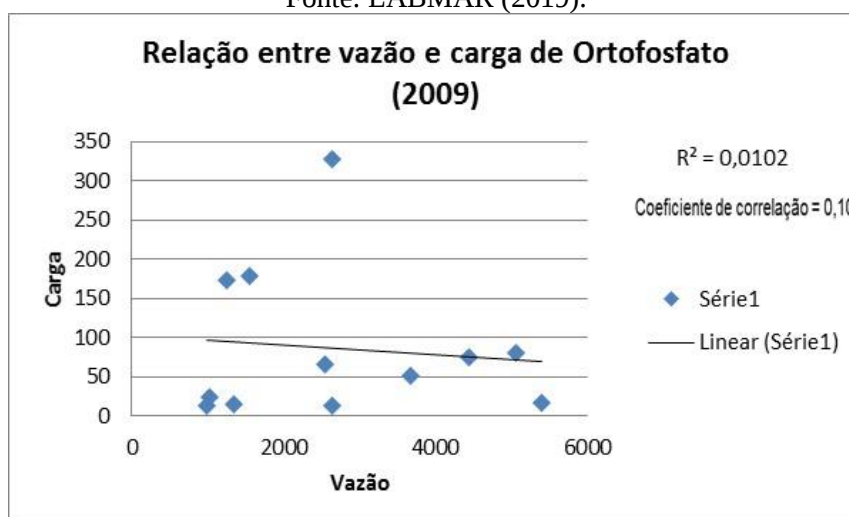


Figura 8. Relação entre vazão e carga de fósforo ortofosfato no RSF em 2009. Elaboração: Autores (2020).
Fonte: LABMAR (2019).

Os valores mensais e a média anual obtida para fósforo ortofosfato no ano hidrológico de 2010 (Figura 6) no Rio São Francisco mostram que os maiores valores encontrados ocorreram nos meses de abril (224,4116 ton.) e junho (115,9631 ton.), a média anual esteve em 51,2716 ton/mês. Os meses com maiores vazões foram janeiro (3538

m³/s), março (2607 m³/s), abril (2846 m³/s) e dezembro (3118 m³/s) e as maiores precipitações ocorreram entre os meses de abril e agosto. Portanto conclui-se que as cargas foram mais elevadas nos meses de maiores precipitações. A Figura 9 apresenta ter havido relação entre vazão e carga de fósforo ortofosfato no RSF em 2010.

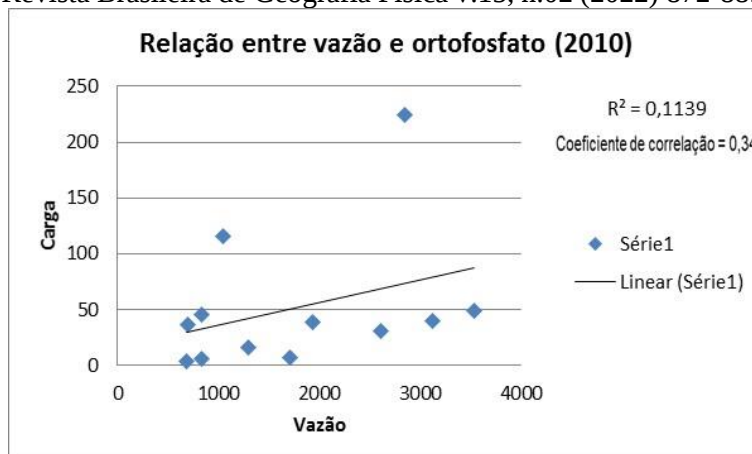


Figura 9. Relação entre vazão e carga de fósforo ortofosfato no RSF em 2010. Elaboração: Autores (2020).
Fonte: LABMAR (2019).

Medeiros et al. (2011) registrou que a menor carga mensal de PID ocorreu em setembro de 2001, atingindo cerca de 6t/mês. A partir de então os fluxos aumentaram devido ao incremento da descarga de água e também as próprias concentrações de fosfato.

Os anos de 2009 e 2010 apresentaram cargas médias superiores ao ano de 2008. As extrapolações acima da média anual não apresentaram comportamento padrão, ocorrendo em meses de vazões elevadas em 2008 e de vazões abaixo da média, em 2009 e 2010.

A presente pesquisa identificou maiores cargas médias que as identificadas por Medeiros et al. (2011) para os anos de 2000 a 2002, onde as exceções foram os meses de fevereiro e março de 2002, com cargas acima de 200 e 300 toneladas respectivamente.

Medeiros et al. (2011) identificou que o fosfato inorgânico dissolvido (PID) apresentou uma menor variação ao longo do estudo, exceto no período de recuperação do fluxo de água, a partir de outubro 2001 a março de 2002.

Rendimento (Yield)

A carga específica se refere à carga anual

Tabela 2. Yield para fosfato.

ANO	ÁREA DA BACIA	CARGA ANUAL	YIELD
2010	639.219 km ²	615,2603893	0,000962518
2009		1037,475021	0,001623035
2008		479,6155674	0,000750314

Fonte: LABMAR (2019).

normalizada pela área da bacia de drenagem (carga anual/área da bacia = t/km²/ano). Esta reflete o rendimento ao longo do tempo do elemento para cada quilômetro quadrado da bacia (Medeiros et al., 2011). É uma taxa importante que permite comparação com os rendimentos de outras bacias, pois retira a influência do peso da área da bacia de drenagem a partir da carga do elemento em questão (Milliman e Meade, 1983).

Para fósforo ortofosfato (Tabela 2), no ano de 2010 foram identificadas 0,000962518 t/km²/ano PID, resultado menor que o identificado em 2009, 0,001623035 t/km²/ano PID. Para 2008 foi identificado (0,000750314 t/km²/ano PID).

Medeiros (2011) encontrou rendimento (Tabela 3) de fósforo inorgânico dissolvido (DIP) de 0,002 toneladas/km²/ano, considerado baixo. Neste estudo o PID pode ser considerado baixo quando comparado com os rios Zambeze e Tocantins (ambos 0,001 t/km²/ano PID) (Tabela 3).

A comparação das cargas específicas de PID do RSF com outros rios tropicais mostram que diferenças de gradiente, tamanho, cobertura vegetal e obras de engenharia tiveram efeitos diferentes sobre as cargas específicas de nutrientes (Medeiros et al., 2011).

Ao se comparar com outros rios tropicais pode-se perceber que o Rio São Francisco apresentou rendimento abaixo de outros rios do mundo. O PID manteve-se abaixo dos índices

encontrados por Medeiros (2003) em todos os anos, indicando que o rendimento médio de fósforo foi reduzido no RSF ao longo dos anos analisados.

Tabela 3. Comparação das cargas específicas (Yield) de PID.

Rio	Área da Bacia 10 ⁶ km ²	Vazão Anual Km ³	PID t/km ² /ano	País
Purari	0,03	84	0,005	Papua
Paraíba do Sul	0,05	28	0,020	Brasil
Madalena	0,24	237	0,121	Colômbia
São Francisco (1)	0,64	100	—	Brasil
São Francisco (2)	0,64	52	0,002	Brasil
SF 2008	0,64	53	0,0009	Brasil
SF 2009	0,64	70	0,001	Brasil
SF 2010	0,64	45	0,0007	Brasil
Tocantins	0,76	372	0,001	Brasil
Orinoco	1,1	1135	0,010	Venezuela
Zambezi	1,33	106	0,001	Moçambique
Zaire	3,7	1200	0,008	Zaire
Amazonas	6,11	6590	0,024	Brasil

Fonte: Medeiros et al., 2011. Adaptação: Autores (2020).

Conclusão

Nas últimas décadas o Rio São Francisco e seu estuário passaram a ter grande redução na descarga de água doce. Este sofreu vários impactos ligados ao sistema de barragens em cascata ao longo de seu curso, essas alterações tiveram seu ápice em 1994, com a instalação da Usina Hidrelétrica de Xingó reduzindo e regularizando os eventos de cheias no baixo RSF, ocorrendo redução de eventos extremos de mínimos e máximos de vazão.

Neste estudo o NID e o PID podem ser considerados baixos quando comparados com outros rios tropicais. Após a conclusão da cascata de barragens e a regulação do fluxo dos rios após 1995, as cargas específicas de NID e PID diminuíram a níveis abaixo de rios tropicais que já possuíam cargas específicas mais baixas.

A comparação das cargas específicas de NID e PID do RSF com outros rios tropicais mostram que diferenças de gradiente, tamanho, cobertura vegetal e obras de engenharia tiveram efeitos diferentes sobre as cargas específicas de nutrientes.

Os valores obtidos mostram que no ano de 2008 o IET médio foi de 39,4964, no ano de 2009 obteve-se 39,1637 e para 2010 o valor foi 39,5986. Com isso, nos três anos em estudo o Rio São Francisco indica um estado ultraoligotrófico, um estado trófico muito baixo, que são corpos de água limpos, com baixa produtividade, concentrações insignificantes de nutrientes sem prejuízos ao uso das águas.

A localização da precipitação é mais significativa para o fluxo de nutrientes no Baixo São Francisco do que a magnitude da precipitação.

Disponibilidade de água doce de boa qualidade representa possibilidade de desenvolvimento econômico, qualidade de vida para as populações humanas, e sustentabilidade dos ciclos biogeoquímicos.

Agradecimentos

À Fapeal (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas) e à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por bolsa concedida.

Ao IGDEMA-UFAL, ao PPGG, ao LABMAR e ao Laboratório de Geoquímica Ambiental. Ao Laboratórios Integrados de Ciências do Mar e Naturais (LABMAR/UFAL), Laboratório de Hidroquímica (LH/IGDEMA/UFAL) e Laboratório de Geoquímica Ambiental (LGA/IGDEMA/UFAL) pelo apoio nas análises laboratoriais e orientações necessárias.

Referências

- Almeida, T. F. S. et al. Análise das precipitações totais anuais no alto e médio São Francisco e sua correlação com a vazão natural. In: I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, 1. 2016, Juazeiro. Anais... Juazeiro: CBHSF, 2016. p. 7-8
- ANA. Agência Nacional de Águas, 2015. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf. Acesso: 06 abr. 2021.
- Bernardes, L.M.C., 1951. Notas sobre o clima da bacia do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Geologia* 13, 473-89.
- Bifano, R. B. A. et al. Avaliação da Qualidade da Água em Microbacias Hidrográficas do Extremo Sul da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 13. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/246046>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Carmouze, J. P., 1994. *The Metabolism of Aquatic Ecosystems*. 1. ed. São Paulo: Editora FAPESP, 253 p.
- Cavalcanti, H. et al. Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: an CBHSF. COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. A bacia. Belo Horizonte [s.d.]. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/a-bacia/#caracteristicas>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- CODEVASF. Companhia de desenvolvimento dos vales do São Francisco e do Parnaíba. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br/>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- Correia, M. F., Dias, M. A. F. S., 2003. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [online] 8. Disponível em: <https://www.abrhydro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=37&SUMARIO=575>. Acesso: 13 abr. 2019.
- Correia, S. O. B., Castilho, C. J. M., 2019. Comitê de bacia hidrográfica do rio São Francisco: criação, estrutura e ação. *Educação Ambiental em Ação* [online] 18. Disponível em: <https://revistaea.org/pf.php?idartigo=3829>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- Costa, P. V. M., Ojima, R., 2020. Transposição do rio São Francisco e a vulnerabilidade sociodemográfica: desafios ao bem-estar da população sertaneja. *Desenvolvimento e Meio Ambiente* [online] 55. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/73381/42378>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Cunha, S. B., 2006. Bacias hidrográficas. In: Cunha, S. B., Guerra, A. J. T. *Geomorfologia do Brasil*. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 229-271.
- CUNHA, S. B., 2007. Impactos geomorfológicos da barragem de Xingó – baixo curso do rio São Francisco. In: SANTOS, M. et al. *Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Lamparina. Pp. 353-374.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. *Balanco Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética*. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. 292 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Esteves, F. A., Panoso, R., 2011. Fósforo. In: Esteves, F. A. *Fundamentos de limnologia*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência. p. 259-281.
- Cavalcanti, H. et al., 2021. Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: na experimental study. *Acta Limnologica Brasiliensia* [online] 33. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X10220>. Acesso em 10 fev. 2022.
- Ferreira, J. G. A transposição das águas do Rio São Francisco na resposta à seca do Nordeste

- brasileiro: Cronologia da transformação da ideia em obra. Campos Neutrais. Revista Latino-Americana de Relações Internacionais [online] 1. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/cn/article/view/9085/6148>. Acesso em: 24 fev. 2022.
- Fraga, M. S. et al., 2021. Avaliação da qualidade das águas superficiais na circunscrição hidrográfica do rio Piranga utilizando análise estatística multivariada e não-paramétrica. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 14. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/244937>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Portal Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em 03 mar. 2022.
- Knoppers, B. et al., 2005. The São Francisco Estuary, Brazil. In: Wangersky, P. (ed.) The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 5- Water Pollution: estuaries. Springer Verlag, Berlin. 51-70 pp.
- Koga, A. P. N. A transposição do rio São Francisco: entre benesses e conflitos pelo uso da água. In: XIII ENANPEGE, 13. 2019, São Paulo. Anais...São Paulo: ANPEGE, 2019. p. 56-84. Disponível em: http://www.enanpege.ggf.br/2019/resources/anais/8/1562620120_ARQUIVO_EnanpegeAnaP_Koga.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.
- Medeiros, P. R. P. et al., 2014. Características ambientais do baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano. Geochimica Brasiliensis [online] 28. Disponível: <https://www.geobrasiliensis.org.br/geobrasiliensis/article/view/384/pdf>. Acesso: 14 abr. 2021.
- Medeiros, P. R. P. et al., 2007. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). Geochimica Brasiliensis [Online] 21. Disponível: <https://geobrasiliensis.org.br/geobrasiliensis/article/view/268/pdf>. Acesso: 14 abr. 2019.
- Medeiros, P. R. P. et al., 2011. Aporte de material em suspensão no baixo rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology [online] 15. Disponível: <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/bjast/article/viewFile/1909/1897>. Acesso: 15 mar. 2018.
- Medeiros, P. R. P. et al., 2016. Inter-annual variability on the water quality in the lower São Francisco river (NE-Brasil). Acta Limnológica Brasiliensis [online] 28. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X3515>. Acesso: 12 mar. 2019.
- Medeiros, P. R. P., 2003. Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do Rio São Francisco, após a construção da Usina Hidroelétrica do Xingó (AL/SE). Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.
- Millimam, J. D., Meade, R.H., 1983. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. J. Geol [online] 91. Disponível: <https://www.jstor.org/stable/30060512>. Acesso: 10 jan. 2020.
- Nimer, E., 1972. Climatologia da região nordeste do Brasil. Ver. Bras. Geog. [online] 34. Disponível: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1972_v34_n2.pdf. Acesso: 15 jun. 2019.
- Okumura, A. T. R. et al., 2020. Determinação da qualidade da água de um rio tropical sob a perspectiva do uso. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 13. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243982>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Papera, J., 2021. Sediment phosphorus fractionation and flux in a tropical shallow lake. Acta Limnologica Brasiliensis [online] 33. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X9020>. Acesso em 10 fev. 2022.
- Passos, F. O. et al., 2021. Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o Modelo SWAT. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 14. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/244450>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Pires, A. P. N., 2019. Estrutura e objetivos da transposição do rio São Francisco: versões de uma mesma história. GEOUSP Espaço e Tempo [Online] 23. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/122366>. Acesso em: 3 mar. 2022.
- Ponte, F. C., 1969. Estudo Morfo-Estrutural da Bacia de Sergipe Alagoas. Bol. Téc. Petrobrás [online] 12. Disponível em: <https://biblat.unam.mx/pt/revista/boletim-tecnico-da-petrobras>. Acesso em: 5 de mar. 2022.
- Prado, D. E., 2003. As caatingas da América do

- Sul. In: Leal, I. R., Tabarelli, M., Silva, J. M. C. (eds.). Ecologia e conservação da caatinga. Ed. Universitária da UFPE, Recife. p. 3-73.
- Ribeiro, M. E. et al., 2021. Análise de Séries Hidrológicas na Bacia Hidrográfica afluente à Usina Hidrelétrica Castro Alves, RS. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 14. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/248601>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Santos, E. O. et al., 2021. Qualidade da Água e Fluxo de Fósforo e Nitrogênio no Rio Paraíba do Meio (AL). Revista Brasileira de Geografia Física [online] 14. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245290>. Acesso em 10 fev. 2022.
- Santos, R. S., 2021. O papel da geografia no ensino de Educação Ambiental. In: Debates em Geografia: perspectivas para estudos e pesquisas. Almeida, R. S. [et al.]. Arapiraca: Eduneal, 2021. 188 p.
- Santos, R. S., 2020. Variação temporal da carga de nutrientes e clorofila no Baixo do São Francisco para os anos de 2008, 2009 e 2010 / Rogério da Silva Santos. 91 p.
- Schmidt, J., 2020. Zooplankton trajectory before, during and after a hydropower dam construction. Acta Limnologica Brasiliensia [online] 32. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X9519>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- Silva, K., 2018. Estimativa da variação temporal da eutrofização no baixo São Francisco a partir da utilização do índice TRIX. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas. 72 p.
- Silva, R. S. C., Aras, L. M. B., 2020. O sertão do Rio São Francisco: caracterização e definição para um estudo do Brasil oitocentista. Revista Nordestina de História do Brasil [online] 2. Disponível em: <https://ojs.historiadaamericalatina.com.br/index.php/rnhb/article/view/79>. Acesso em: 18 fev. 2022
- Von Sperling, M., 2005. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 160 p.