

Análise de Fisher-Shannon da vazão do rio São Francisco: a influência de barragens e reservatórios

Fisher-Shannon analysis of the São Francisco river flow: the influence of dams and reservoirs

Análisis de Fisher-Shannon de la tasa de flujo del río São Francisco: la influencia de presas y embalses

Recebido: 28/09/2020 | Revisado: 04/10/2020 | Aceito: 05/10/2020 | Publicado: 06/10/2020

Íkaro Daniel de Carvalho Barreto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7253-806X>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: daniel.carvalho.ib@gmail.com

Eucymara França Nunes Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-0911>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: eucymara@gmail.com

Tatijana Stosic

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5691-945X>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: tastosic@gmail.com

Resumo

Investigamos como a construção das barragens de Sobradinho e Xingó afetaram a vazão diária do rio São Francisco, usando a análise de Fisher – Shannon. Foram analisadas as séries temporais de vazão diária das estações fluviométricas de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL, que estão a jusante dos reservatórios de Sobradinho e Xingó nos períodos anterior a construção de ambos os reservatórios, depois da construção de Sobradinho e após a construção de Xingó e após a construção de ambos os reservatórios. Aplicamos a análise de Fisher-Shannon nas amostras, e em janelas móveis avaliando as diferenças por meio do teste de Kruskal-Wallis. Este método quantifica simultaneamente as propriedades locais e globais da função de densidade de probabilidade do sinal analisado. Observamos que no regime natural, o grau de organização temporal das séries de vazão diminuiu com aumento de área de drenagem. Após a construção de Sobradinho o grau de regularidade da dinâmica da vazão

diminuiu em relação ao regime natural, e após a construção de Xingó observamos uma dinâmica de vazão mais regular e mais organizada. Assim, as operações dos reservatórios alteraram o grau de regularidade, e de organização temporal das séries de vazão, conforme indicado por valores de entropia e de informação de Fisher, respectivamente.

Palavras-chave: Análise de fisher-shannon; Rio São Francisco; Reservatórios.

Abstract

We investigated how the construction of the Sobradinho and Xingó dams affected the daily streamflow of the São Francisco River, using Fisher - Shannon analysis. The daily streamflow time series of the fluviometric stations Juazeiro / BA and Pão de Açúcar / AL that are located downstream of the Sobradinho and Xingó reservoirs were analyzed for the periods prior to the construction of both reservoirs, after the construction of Sobradinho and before the construction of Xingó, and after the construction of both reservoirs. We applied Fisher-Shannon analysis to streamflow subseries and in moving windows, evaluating differences using the Kruskal-Wallis test. This method simultaneously quantifies the local and global properties of the probability density function of the analyzed signal. We observed that in the natural regime the degree of temporal organization of the streamflow series decreased with an increase in the drainage area. After the construction of Sobradinho the degree of regularity of the streamflow dynamics decreased comparing to the natural regime and after the construction of Xingó we observed a more regular and more organized streamflow dynamics. Thus, the operations of the reservoirs changed the degree of regularity and temporal organization of the streamflow series, as indicated by the entropy and Fisher information values, respectively.

Keywords: Fisher-shannon analysis; São Francisco river; Reservoirs.

Resumen

Investigamos cómo la construcción de las presas de Sobradinho y Xingó afectó el caudal diario del río San Francisco, utilizando el análisis de Fisher-Shannon. Se analizaron las series temporales de caudal diario de las estaciones fluviométricas Juazeiro / BA y Pan de Azucar / AL que se ubican aguas abajo de los embalses de Sobradinho y Xingó para los períodos anteriores a la construcción de ambos embalses, luego de la construcción de Sobradinho y antes de la construcción de Xingó, y después de la construcción de ambos embalses. Aplicamos el análisis de Fisher-Shannon a sub series de caudal y en ventanas móviles, evaluando las diferencias mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Este método cuantifica

simultaneamente las propiedades locales y globales de la función de densidad de probabilidad de la señal analizada. Observamos que en el régimen natural el grado de organización temporal de la serie de caudales disminuyó con el aumento del área de drenaje. Posteriormente a la construcción de Sobradinho el grado de regularidad de la dinámica del caudal fluvial disminuyó en comparación con el régimen natural, luego de la construcción del Xingó observamos una dinámica fluvial más regular y organizada. Así, las operaciones de los embalses cambiaron el grado de regularidad y organización temporal de la serie de caudales, como lo indican los valores de entropía y de información de Fisher, respectivamente.

Palabras clave: Análisis de fisher-shannon; Río San Francisco; Reservatórios.

1. Introdução

O uso sustentável dos recursos hídricos e sua conservação é um dos maiores desafios do século XXI (Pfirman, 2003). Esses recursos são influenciados por vários fatores naturais e antropogênicos, como mudanças climáticas (Chai et al., 2020), mudanças no uso da terra (Woldesenbet, Elagib, Ribbe, & Heinrich, 2017), e práticas de gestão que aumentam o acesso humano à água (Magilligan & Nislow, 2005).

A construção da barragem e a operação do reservatório tem grande impacto na ecologia e na diversidade biológica da zona aquática e ribeirinha (Tonkin, Merritt, Olden, Reynolds, & Lytle, 2018). Embora a restauração completa do regime de vazão natural seja possível apenas com a remoção completa da barragem, a modificação da operação da barragem pode produzir o fluxo que se assemelhará ao regime de vazão natural, que é crucial para a preservação da integridade ecológica das bacias hidrográficas (Richter & Thomas, 2007). O primeiro passo nessa direção é a avaliação da alteração hidrológica induzida pela barragem, o que requer uma análise empírica cuidadosa e extensa dos dados da vazão antes e após a construção da barragem (Döll, Fiedler, & Zhang, 2009).

As alterações hidrológicas tradicionalmente foram avaliadas por métodos estatísticos clássicos (Matteau, Assani, & Mesfioui, 2009), e métodos que utilizam o conjunto de indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes (Richter, Baumgartner, Powell, & Braun, 1996). Esses indicadores foram definidos considerando as características da vazão relevantes para a “saúde do rio”: magnitude, frequência, duração, período de ocorrência e taxa de mudança.

Entretanto, outras características do fluxo que emergem como resultado da complexidade dos sistemas hidrológicos, também podem ser relevantes para avaliação das alterações hidrológicas. Em últimas décadas vários conceitos e métodos foram desenvolvidos e aplicados em fenômenos hidrológicos: teoria do caos (Sivakumar, 2009), análise multifractal (Rego, Frota, & Gusmão, 2013), medidas baseadas em teoria de informação (Li & Zhang, 2008) e redes complexas (Fang, Sivakumar, & Woldemeskel, 2017), foram utilizados para avaliar o grau de não linearidade e a complexidade dos processos hidrológicos, e demonstrou sucesso na detecção de alterações hidrológicas causadas por fatores naturais e humanos (Stosic, Telesca, de Souza Ferreira, & Stosic, 2016; Zhou, Zhang, & Singh, 2014). Entre esses métodos, medidas de teoria de informação como entropias foram menos utilizadas na análise de fenômenos hidrológicos, e seu potencial na avaliação de alterações hidrológicas ainda não está claro.

Nosso trabalho é concebido como uma contribuição nessa direção, utilizamos o método de Fisher Shannon (Vignat & Bercher, 2003) que quantifica simultaneamente as propriedades locais e globais da função de densidade de probabilidade do sinal analisado, para avaliar alterações hidrológicas causadas pela construção de barragens e reservatórios, na seção Sub Médio e do Baixo São Francisco, no Brasil que é altamente afetado por diversas práticas de uso da água (Maneta et al., 2009).

Analizamos as séries temporais diárias de vazão registradas a jusante de barragens e reservatórios. Também aplicamos a análise de Fisher – Shannon em janelas deslizantes e analisamos a influência da construção de barragens e reservatórios na evolução temporal da regularidade e organização estrutural de dinâmica da vazão.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

A bacia do rio São Francisco possui aproximadamente 638.466 km² de área (7,5% do território nacional), cobrindo os seguintes estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal. De suas cabeceiras na Serra da Canastra, Minas Gerais, percorre cerca de 2.800 km e chega a foz no Oceano Atlântico em Piaçabuçu, Alagoas e Brejo Grande, Sergipe. A área possui 503 municípios e está dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto, Médio, Sub-médio e Baixo São Francisco (Fonseca, de Ávila Modesto, Carneiro, Lima, & de Almeida Monte-Mor, 2020).

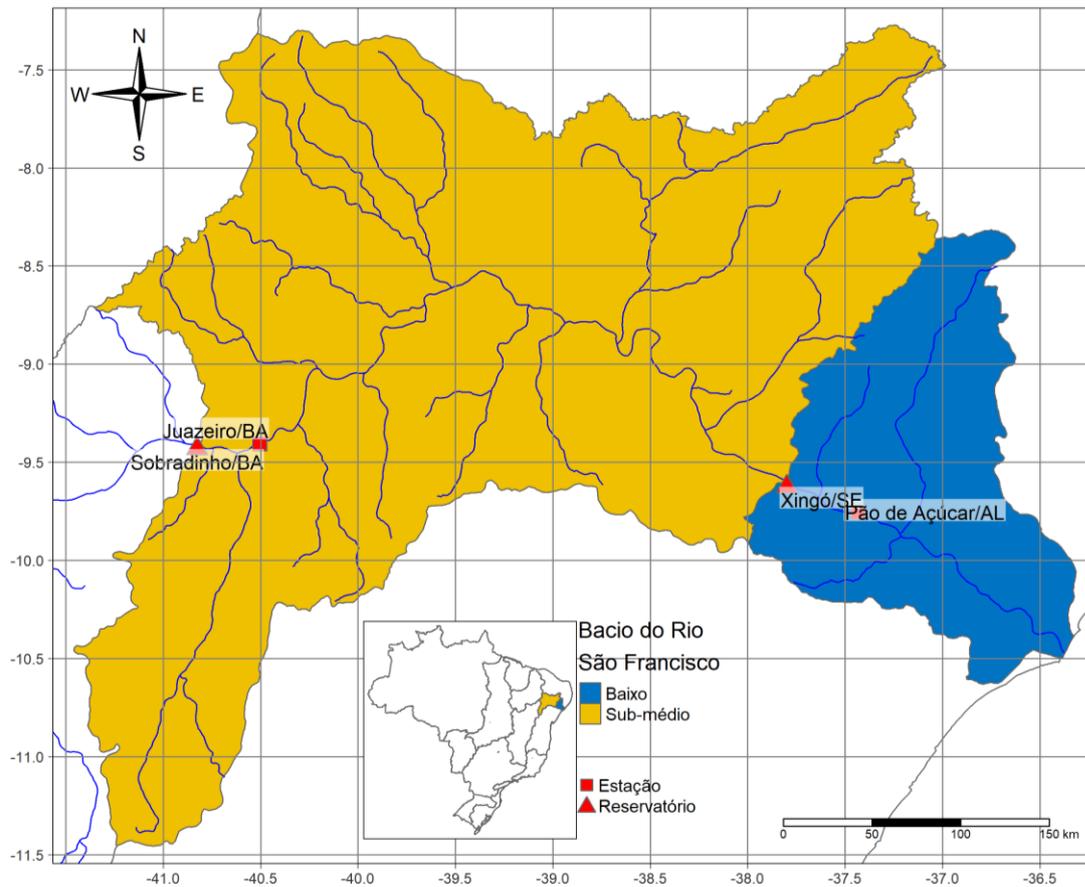
A população total é de aproximadamente 14,3 milhões de habitantes (cerca da metade localizada na região do alto São Francisco), com população predominantemente urbana, representada por 77% da população total (ANA, 2020). A cobertura vegetal da bacia é diversa: Mata Atlântica (cabeceiras), Cerrado (Alto e Médio São Francisco), Caatinga (Médio e Sub-médio São Francisco), Mata Atlântica e formações nativas (mangue e vegetação costeira) em Baixo São Francisco.

O clima é subsumido seco na região alta da bacia, semiárido na região média, semiárido e árido na região do Sub-médio e subúmido na região do baixo São Francisco. A precipitação média anual varia de 1.500 mm no Alto São Francisco a 350 mm no Sub-médio São Francisco, onde secas severas ocorrem frequentemente como resultado de baixas chuvas e alta evapotranspiração (Bezerra, Silva, Santos e Silva, & de Carvalho, 2019). Cerca de 58% do território da bacia está na região semiárida, principalmente na parte nordeste do Brasil. Ao longo do ano, o fluxo natural do rio São Francisco varia entre $1.077\text{m}^3 / \text{s}$ a $5.290\text{m}^3 / \text{s}$, a média anual é de $2.846\text{m}^3 / \text{s}$ (ANA, 2020). Em 16 anos, 77% da demanda total é usada para irrigação, 11% para demanda urbana e 7% para demanda industrial.

O importante papel do rio São Francisco está na geração de eletricidade, com potencial instalado em 2013 de 10.708 MW (12% do total do país). Ao longo do rio, existem várias grandes barragens listadas em ordem a jusante: Três Marias, Sobradinho, Luiz Gonzaga, Moxotó, Paulo Afonso I, II, III e IV e Xingó, que foram construídas entre 1962 (Três Marias) e 1994 (Xingó).

Existem quatro reservatórios com grande volume de armazenamento: Três Marias localizadas no Alto São Francisco, Sobradinho e Luiz Gonzaga localizadas no Sub-médio, São Francisco e Xingó, localizado no Baixo São Francisco. As maiores usinas hidrelétricas são Xingó (3.162 MW), Paulo Afonso IV (2.462 MW), Luiz Gonzaga (1.479 MW) e Sobradinho (1.050 MW) (CHESF, 2015). A Figura 1 mostra o mapa da bacia do rio São Francisco com regiões fisiográficas e localização de barragens e estações hidrológicas.

Figura 1. Localização da bacia do rio São Francisco, regiões fisiográficas, barragens e estações hidrológicas.



Fonte: Acervo dos autores.

2.2. Dados

Os dados utilizados neste trabalho são séries diárias de vazão obtidos em duas estações de medição. A estação de Juazeiro está localizada a cerca de 40 km a jusante da barragem de Sobradinho e é influenciada pela operação do reservatório. A estação Pão de Açúcar está localizada a cerca de 45 km a jusante da barragem de Xingó, que é a mais a jusante e a última construída das barragens em cascata. Os dados são fornecidos pela Agência Nacional de Águas (Agência Nacional de Águas-ANA) (<http://hidroweb.ana.gov.br>, último acesso em setembro de 2020). As informações sobre estações e registro de dados são fornecidas na Tabela 1.

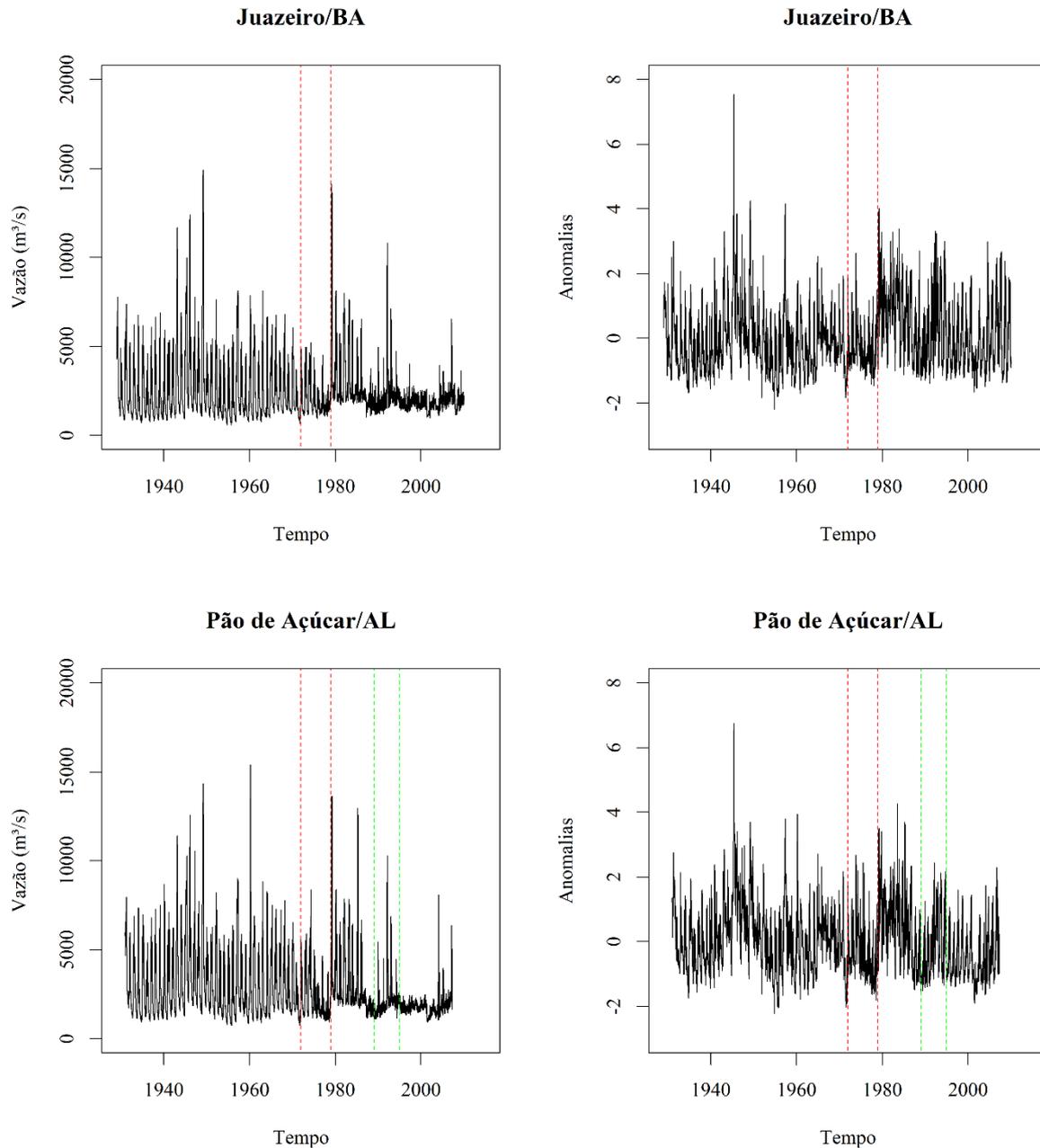
Tabela 1. Descrição das Estações Fluviométricas

	Juazeiro/BA	Pão de Açúcar/AL
Código da Estação	48020000	49370000
Latitude	-9,4064	-9,7514
Longitude	-40,5036	-37,4464
Altitude (m)	357,74	8,1
Área de Drenagem (Km ²)	516000	615000
Período	1929-2009	1931-2007
Localização da Bacia	Sub-médio	Baixo

Fonte: ANA.

Analizamos séries sem tendência (anomalias) $z_{i,k} = (x_{i,k} - \mu_i) / \sigma_i$ em que $x_{i,k}$ e o valor observado em dia i e ano k , μ_i e σ_i são a média e o desvio padrão calculados para cada dia i do calendário ao longo de k anos (por exemplo, $i = 1, \dots, 365$; $k = 1929, \dots, 2009$ para a estação de Juazeiro). A série diária original da vazão e a série diária de anomalias são mostradas na Fig. 2. A média da vazão da estação de Juazeiro é de 2473 m³/s (DP: 1659 m³/s) e Pão de Açúcar é de 2803 m³/s (DP: 1835 m³/s).

Figura 2. Séries temporais de vazão original e anomalias. As linhas verticais indicam o início da construção e o início da operação das barragens de Sobradinho (vermelho) e Xingó (verde).



Fonte: Acervo dos autores.

2.3. Análise de Fisher-Shannon

A análise de Fisher-Shannon consiste na análise conjunta da medida de informação de Fisher (FIM – *Fisher Information Measure*), que quantifica o grau de organização ou ordem

em um sinal, e a entropia de Shannon (SE – *Shannon Entropy*), que quantifica o grau de desordem (Vignat & Bercher, 2003). O conceito de informação de Fisher (FI) foi introduzido na estatística (Fisher, 1925), enquanto o caso especial de FI de um parâmetro de localização de uma distribuição paramétrica foi denominado medida de informação de Fisher (FIM) (Frieden, 1990). Posteriormente, a FIM foi aplicada para análises de séries temporais em fisiologia (Martin, Pennini, & Plastino, 1999), geofísica (Telesca, Lovallo, Hsu, & Chen, 2011), climatologia (Guignard et al., 2019) e hidrologia (Pierini, Restrepo, Lovallo, & Telesca, 2015).

Para variável unidimensional contínua X com função densidade de probabilidade (PDF) $f(x)$, FIM é definido como (Vignat & Bercher, 2003):

$$I_X = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial}{\partial x} f(x) \right)^2 \frac{dx}{f(x)}, (1)$$

e a entropia de Shannon H_X como:

$$H_X = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log f(x) dx, (2)$$

A medida de informação de Fisher descreve as propriedades locais da função de densidade de probabilidade (PDF) da série, enquanto a entropia de Shannon descreve suas propriedades globais (Frieden, 1990).

Em vez da entropia de Shannon H_X , é mais conveniente usar a medida chamada potência de entropia Shannon (SEP – *Shannon Entropy Power*) (Angulo, Antolín, & Sen, 2008):

$$N_X = \frac{1}{2\pi e} e^{2H_X}, (3)$$

que é igual à variância para um PDF gaussiano. O produto $C_X = N_X I_X$ satisfaz a “desigualdade isoperimétrica” $N_X I_X \geq 1$, que indica que a entropia de Shannon e FIM são intrinsecamente relacionadas, e podem ser usadas em um conjunto para caracterizar o comportamento não estacionário de sinais complexos (Dembo, Cover, & Thomas, 1991).

A análise conjunta FIM / SEP é realizada através do plano de informação de Fisher-Shannon (FS), para o qual o SEP é usado para a abcissa, e FIM para a ordenada (Vignat & Bercher, 2003). O sinal é representado como um ponto com coordenadas (N_X, I_X) que podem ser localizadas apenas na parte do FS que satisfaz $N_X I_X \geq 1$.

A SEP e o FIM dependem apenas da função de densidade de probabilidade $f(x)$. Para conjuntos gerados por sistemas complexos, a análise de Fisher-Shannon pode ser

implementada com estimativa não-paramétrica de densidade, evitando suposições paramétricas na distribuição. Neste trabalho, usamos a estimativa de densidade por Kernel, que se mostrou mais confiável que o método do histograma, que requer a discretização das fórmulas (1) e (2) (Telesca & Lovallo, 2017). A estimativa de densidade por Kernel é dada por (Raykar & Duraiswami, 2006):

$$\widehat{f}_M(x) = \frac{1}{Mb} \sum_{i=1}^M K\left(\frac{x-x_i}{b}\right), (4)$$

onde $b > 0$ é o parâmetro da largura de banda, M é o comprimento da série, e $K(u)$ é a função do Kernel, que é uma função simétrica contínua que satisfaz $K(u) \geq 0$ e $\int_{-\infty}^{+\infty} K(u)du = 1$. O mais utilizado é o Kernel gaussiano $K(u) = (2\pi)^{-1/2}exp(-u^2/2)$, que fornece:

$$\widehat{f}_M(x) = \frac{1}{M\sqrt{2\pi b^2}} \sum_{i=1}^M e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2b^2}}. (5)$$

3. Resultados e Discussões

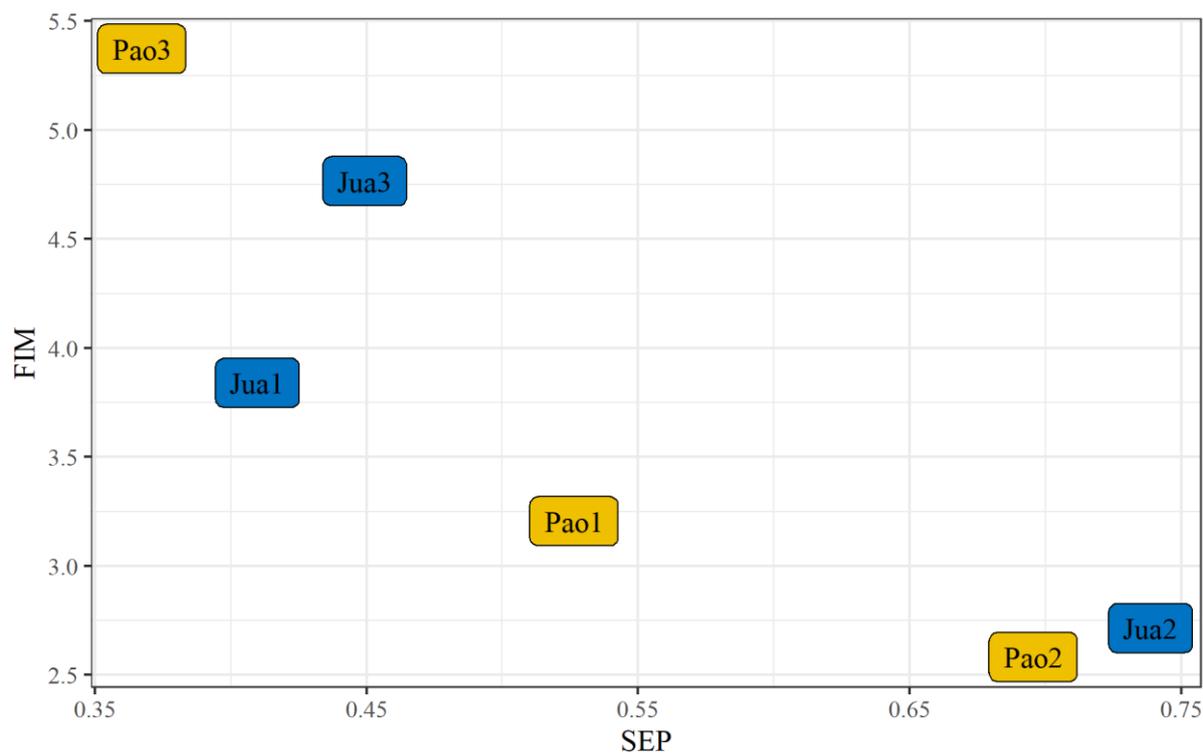
Os valores de SEP e FIM foram calculados para séries temporais diárias das anomalias de vazão para estações Juazeiro e Pão de Açúcar. Os resultados referentes as subamostras definidas pela construção dos reservatórios Sobradinho e Xingó e o plano Fisher-Shannon com localização da subamostras são apresentados na Tabela 2 e na Figura 3 respectivamente.

Tabela 2. Valores de SEP e FIM das séries de anomalias de vazão para estações Juazeiro e Pão de Açúcar.

	SEP	FIM
Juazeiro		
J1: 01/29-11/79	0,410	3,841
J2: 12/79-12/94	0,739	2,715
J3: 01/95-12/09	0,449	4,765
Pão de Açúcar		
P1: 01/31-11/79	0,526	3,206
P2: 12/79-12/94	0,695	2,583
P3: 01/95-04/07	0,367	5,373

Fonte: Acervo dos autores.

Figura 3. Posição das séries de anomalias de vazão no plano Entropia-Informação de Fisher para estações Juazeiro e Pão de Açúcar para os períodos antes, entre e depois da construção das barragens (Tabela 2).

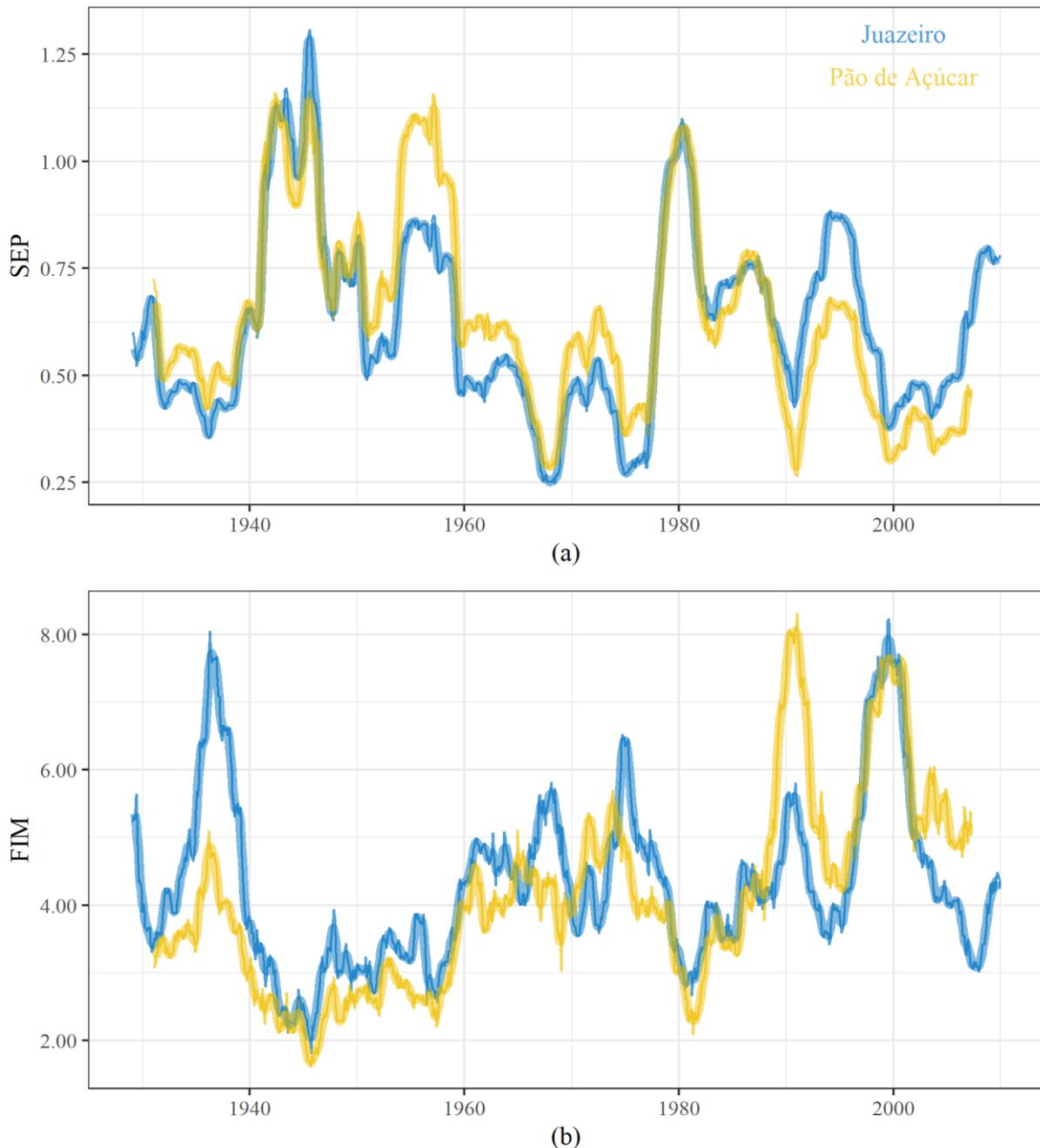


Fonte: Acervo dos autores.

Para analisar a evolução temporal do grau de regularidade e organização temporal da vazão aplicamos a análise de Fisher – Shannon em janelas deslizantes de 10 anos e saltos de

30 dias. Os gráficos de SEP e FIM, dependente do tempo para duas estações é mostrado na Figura 4.

Figura 4. Evolução temporal do índice de SEP(a) e FIM (b) de anomalias de vazão (suavizado com média móvel de 30 dias) para estações Juazeiro e Pão de Açúcar.



Fonte: Acervo dos autores.

As médias destes valores para janelas que pertencem aos períodos antes, entre e depois da construção dos reservatórios (J1, P1; J2, P2; J3, P3) são apresentadas na Tabela 4, onde

pode ser observado que a tendência de alteração da vazão observada na Tabela 3 foi confirmada: o aumento de SEP e diminuição de FIM após a construção de Sobradinho e diminuição de SEP e aumento de FIM após da construção de Xingó.

Tabela 3. Médias de SEP e FIM das janelas móveis (Figura 4) para os períodos antes, entre e depois da construção das barragens.

	SEP	FIM
	Média (DP)	Média (DP)
Juazeiro		
01/29-11/79	0,606 (0,236)	4,136 (1,169)
12/79-12/94	0,723 (0,141)	4,048 (0,707)
01/95-12/09	0,581 (0,152)	5,046 (1,502)
p-valor	<0,001	<0,001
Pão de Açúcar		
01/31-11/79	0,681 (0,227)	3,496 (0,897)
12/79-12/94	0,654 (0,187)	4,591 (1,638)
01/95-04/07	0,420 (0,102)	5,860 (1,035)
p-valor	<0,001	<0,001
Juazeiro vs Pão de Açúcar		
Anterior a Xingó e Sobradinho	<0,001	<0,001
Anterior a Xingó e Depois de Sobradinho	<0,001	<0,001
Depois de Xingó e Sobradinho	<0,001	0,067

Legenda: SEP – *Shannon Entropy Power*. FIM – *Fisher Information*. DP – Desvio Padrão. Teste de Kruskal-Wallis.

Fonte: Acervo dos autores.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que estas diferenças foram estatisticamente significativas. Comparando os resultados de Juazeiro e Pão de Açúcar para os mesmos períodos observamos que no primeiro período, durante regime natural (J1, P1), a média de SEP é maior e FIM menor para estação Pão de Açúcar, enquanto durante os períodos, depois da construção de Sobradinho (J2, P2) e Xingó (J3, P3), para mesma estação está tendência é revertida: a média de SEP é menor e de FIM maior do que a estação Juazeiro.

Baseando-se no teste de Kruskal-Wallis, estas diferenças foram estatisticamente significativas em todos os casos com exceção das médias de FIM para terceiro período (J3,

P3). Estes resultados estão em acordo com os resultados dos estudos anteriores utilizando outras medidas de entropia. Stosic et al. (2016) aplicaram o método de entropia de permutação nas séries temporais de vazão da estação de Juazeiro, e também encontraram que depois de construção da barragem Sobradinho, a dinâmica da vazão se tornou menos regular (maior valor de entropia) (Stosic et al., 2016). Barreto et al. (2020) analisaram as séries temporais de vazão das estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar utilizando o método de entropia amostral. Os resultados mostraram que na estação São Francisco localizada a montante das barragens, não houve alteração significativa na alteração dos valores da entropia, enquanto que para as estações de Juazeiro e Pão de Açúcar os valores de entropia mudaram na mesma direção como obtido no presente estudo (Barreto et al., 2020).

4. Considerações Finais

Neste trabalho, investigamos como a construção das barragens de Sobradinho e Xingó afetaram a vazão diária do rio São Francisco, Brasil, usando a análise de Fisher – Shannon.

Os resultados mostraram que as operações dos reservatórios alteraram a variabilidade temporal das séries de vazão, diminuindo o grau de regularidade, e aumentando o grau de organização temporal conforme indicado por valores de entropia mais altos e os valores de informação de Fisher mais baixos, respectivamente.

Trabalhos futuros poderiam incluir análise de dados das estações fluviométricas em várias localizações ao longo do rio São Francisco com objetivo de investigar a relação entre a dinâmica de vazão e de outros fatores como área de drenagem, diversidade climática e uso de solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio das agências CAPES e CNPq.

Referências

ANA. (2020). Agência Nacional de Águas. Recuperado de <http://hidroweb.ana.gov.br>

Angulo, J. C., Antolín, J., & Sen, K. D. (2008). Fisher–Shannon plane and statistical complexity of atoms. *Physics Letters A*, 372(5), 670–674.

Barreto, I. D. de C., Stosic, T., Filho, M. C., Delrieux, C., Singh, V. P., Asce, D. M., & Stosic, B. (2020). Complexity Analyses of Sao Francisco River Streamflow : Influence of Dams and Reservoirs, 25(10), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001996)

Bezerra, B. G., Silva, L. L., Santos e Silva, C. M., & de Carvalho, G. G. (2019). Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1–2), 565–576. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2396-6>

Chai, Y., Yue, Y., Zhang, L., Miao, C., Borthwick, A. G. L., Zhu, B., ... Dolman, A. J. (2020). Homogenization and polarization of the seasonal water discharge of global rivers in response to climatic and anthropogenic effects. *Science of The Total Environment*, 709, 136062.

CHESF. (2015). Companhia Hidrelétrica do Rio São Francisco. Recuperado de <https://www.chesf.gov.br>

Dembo, A., Cover, T. M., & Thomas, J. A. (1991). Information theoretic inequalities. *IEEE Transactions on Information Theory*, 37(6), 1501–1518.

Döll, P., Fiedler, K., & Zhang, J. (2009). Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12), 2413–2432. <https://doi.org/10.5194/hess-13-2413-2009>

Fang, K., Sivakumar, B., & Woldemeskel, F. M. (2017). Complex networks, community structure, and catchment classification in a large-scale river basin. *Journal of Hydrology*, 545, 478–493.

Fisher, R. A. (1925). Theory of statistical estimation. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* (Vol. 22, pp. 700–725). Cambridge University Press.

Fonseca, E. R., de Ávila Modesto, F., Carneiro, G. C. A., Lima, N. F. S., & de Almeida Monte-Mor, R. C. (2020). Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco—Estudos de caso no Estado da Bahia. *Research, Society and Development*, 9(9), e823997929–e823997929.

Frieden, B. R. (1990). Fisher information, disorder, and the equilibrium distributions of physics. *Physical Review A*, 41(8), 4265.

Guignard, F., Lovallo, M., Laib, M., Golay, J., Kanevski, M., Helbig, N., & Telesca, L. (2019). Investigating the time dynamics of wind speed in complex terrains by using the Fisher–Shannon method. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 523, 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.02.048>

Li, Z., & Zhang, Y.-K. (2008). Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(4), 507–512.

Magilligan, F. J., & Nislow, K. H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1–2), 61–78.

Maneta, M. P., Torres, M., Wallender, W. W., Vosti, S., Kirby, M., Bassoi, L. H., & Rodrigues, L. N. (2009). Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(8), 1191–1200. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.008>

Martin, M. T., Pennini, F., & Plastino, A. (1999). Fisher's information and the analysis of complex signals. *Physics Letters A*, 256(2–3), 173–180.

Matteau, M., Assani, A. A., & Mesfioui, M. (2009). Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology*, 371(1–4), 120–128.

Pfirman, S. L. (2003). *Complex environmental systems: synthesis for earth, life, and society in the 21st century: A 10-year outlook for the National Science Foundation*. National Science Foundation.

Pierini, J. O., Restrepo, J. C., Lovallo, M., & Telesca, L. (2015). Discriminating between different streamflow regimes by using the fisher-shannon method: An application to the Colombia rivers. *Acta Geophysica*, 63(2), 533–546. <https://doi.org/10.2478/s11600-014-0229->

Raykar, V. C., & Duraiswami, R. (2006). Fast optimal bandwidth selection for kernel density estimation. In *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining* (pp. 524–528). SIAM.

Rego, C. R. C., Frota, H. O., & Gusmão, M. S. (2013). Multifractality of Brazilian rivers. *Journal of Hydrology*, *495*, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.046>

Richter, B. D., Baumgartner, J. V, Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, *10*(4), 1163–1174.

Richter, B. D., & Thomas, G. A. (2007). Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecology and Society*, *12*(1). <https://doi.org/10.5751/ES-02014-120112>

Sivakumar, B. (2009). Nonlinear dynamics and chaos in hydrologic systems: Latest developments and a look forward. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *23*(7), 1027–1036. <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0265-z>

Stosic, T., Telesca, L., de Souza Ferreira, D. V., & Stosic, B. (2016). Investigating anthropically induced effects in streamflow dynamics by using permutation entropy and statistical complexity analysis: A case study. *Journal of Hydrology*, *540*, 1136–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.034>

Telesca, L., & Lovallo, M. (2017). On the performance of Fisher Information Measure and Shannon entropy estimators. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *484*, 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.184>

Telesca, L., Lovallo, M., Hsu, H.-L., & Chen, C.-C. (2011). Analysis of dynamics in magnetotelluric data by using the Fisher–Shannon method. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *390*(7), 1350–1355.

Tongal, H., Demirel, M. C., & Moradkhani, H. (2017). Analysis of dam-induced cyclic patterns on river flow dynamics. *Hydrological Sciences Journal*, *62*(4), 626–641.

Tonkin, J. D., Merritt, D. M., Olden, J. D., Reynolds, L. V., & Lytle, D. A. (2018). Flow regime alteration degrades ecological networks in riparian ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2(1), 86–93.

Vignat, C., & Bercher, J.-F. (2003). Analysis of signals in the Fisher–Shannon information plane. *Physics Letters A*, 312(1–2), 27–33.

Woldesenbet, T. A., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2017). Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 575, 724–741.

Zhou, Y., Zhang, Q., Li, K., & Chen, X. (2012). Hydrological effects of water reservoirs on hydrological processes in the East River (China) basin: complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. *Hydrological Processes*, 26(21), 3253–3262.

Zhou, Y., Zhang, Q., & Singh, V. P. (2014). Fractal-based evaluation of the effect of water reservoirs on hydrological processes: The dams in the Yangtze River as a case study. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2), 263–279. <https://doi.org/10.1007/s00477-013-0747-5>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Íkaro Daniel de Carvalho Barreto – 33,3%

Eucymara França Nunes Santos – 33,3%

Tatijana Stosic – 33,4%