

Leika Irabele Tenório de Santana

Análise de alterações hidrológicas causadas pela atividade humana utilizando Gráfico de Recorrência

Recife – PE

20 de fevereiro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Análise de alterações hidrológicas causadas pela atividade humana utilizando Gráfico de Recorrência

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 20/02/2024 pela comissão examinadora

Área de concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientadora: Profa. Dra. Tatijana Stosic
Coorientadores: Dr. Ikaro Daniel de Carvalho Barreto
Dra. Lidiane da Silva Araújo

Recife – PE

20 de fevereiro de 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S232a Santana, Leika Irabele Tenório de
 Análise de alterações hidrológicas causadas pela atividade humana utilizando Gráfico de Recorrência / Leika
 Irabele Tenório de Santana. - 2024.
 78 f. : il.
- Orientadora: Tatijana Stosic.
 Coorientador: Ikaro Daniel de Carvalho Barreto.
 Inclui referências.
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e
 Estatística Aplicada, Recife, 2024.
1. Barragem. 2. Vazão. 3. CRP . 4. RQA. 5. OPRP. I. Stosic, Tatijana, orient. II. Barreto, Ikaro Daniel de Carvalho,
 coorient. III. Título

CDD 519.5

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA
Análise de alterações hidrológicas causadas pela atividade humana utilizando Gráfico de Recorrência

Leika Irabele Tenório de Santana

Tese julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 20/02/2024 pela comissão examinadora

Orientadora:

Profa. Dra. Tatijana Stosic
Orientadora

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antônio Samuel Alves da Silva
Universidade Federal Rural de
Pernambuco

Prof. Dr. Silvio Fernando Alves Xavier
Júnior
Universidade Estadual da Paraíba

Dr. Ikaro Daniel de Carvalho Barreto
Centro Brasileiro de Pesquisa em
Avaliação e Seleção e de
Promoção de Eventos

Dra. Lidiane da Silva Araújo
Universidade Federal do Pampa

*Dedico a minha mãe, Ana Glória,
e meu avô, Genilson Tenório.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me iluminar e abrir oportunidades para meus sonhos. Sou grata pelas pessoas especiais que formam o meu mundo: minha mãe, por ter me tornado uma mulher forte, de princípios e valores, e meu avô, que se tornou meu pai.

Agradeço pela pessoa especial que entrou em minha vida: meu amor, meu companheiro, meu namorado Tiago, que me apoia e dá força para concluir os meus estudos.

Sou muito grata a minha orientadora, Profa. Dra. Tatijana Stosic, pelo apoio, paciência, amizade e orientação. Agradeço a Lidiane por toda ajuda e esclarecimento de dúvidas. Agradeço a Ikaro pelo esclarecimento de dúvidas e ajuda com o *software* R.

Sou grata as minhas tias, Mônica e Cláudia, por todo apoio e incentivo. A minha amiga, irmã, Mickaelle te agradeço pelas conversas, conselhos e apoio.

Agradeço aos amigos do doutorado pela amizade e conversas descontraídas. Aos colegas e familiares não mencionados e que colaboraram de forma direta ou indireta na realização do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Agradeço a Agência Nacional de Águas (ANA) pela disponibilização dos dados, ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada (PPGBEA) e à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo apoio na elaboração do trabalho.

*“A natureza é o único livro que
oferece um conteúdo valioso em
todas as suas folhas.”
Johann Goethe*

Resumo

O objetivo deste trabalho é investigar a natureza dos processos hidrológicos da bacia do Rio São Francisco quanto à influência da barragem de Sobradinho (BA). Para detectar possíveis alterações hidrológicas causadas pela construção dessa barragem, analisaram-se os dados diários de vazão e precipitação durante o período de 1929 a 2009, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). Utilizou-se o método Gráfico de Recorrência (RP), sua extensão bivariada, o Gráfico de Recorrência Cruzada (CRP), e sua modificação, o Gráfico de Recorrência de Padrão Ordinal (OPRP), bem como a Análise de Quantificação de Recorrência (RQA), desenvolvidos para analisar a dinâmica não linear das séries temporais. A análise gráfica dos padrões RP/OPRP e o correspondente conjunto de medidas quantitativas obtidas pela RQA indicaram que a operação do reservatório induziu alterações no escoamento a jusante (registrado na estação de Juazeiro) no sentido de um regime menos previsível e menos estável, enquanto que a dinâmica do escoamento a montante (na estação de São Francisco) permaneceu inalterada. Com a evolução dos parâmetros do RQA, identificou-se a influência da barragem de Três Marias na estação a jusante de São Francisco. Ambas as barragens induziram as mesmas alterações de vazão a jusante, com maior grau de alteração para a estação de Juazeiro devido à menor distância da barragem a montante. A janela móvel OPRP mostrou sensibilidade no que diz respeito ao funcionamento da barragem e também ao processo de amortecimento com o aumento da distância entre a barragem e as estações hidrológicas a jusante. Para o período anterior à construção, os valores dos parâmetros de RQA diminuíram conforme o aumento das escalas temporais, mostrando que a complexidade da dinâmica da vazão depende da escala de tempo. A partir da análise da relação entre vazão e precipitação, observou-se que durante regime natural a dinâmica de vazão foi mais previsível do que dinâmica de precipitação. A análise CRP indicou uma diminuição de sincronização entre processos hidrológicos da bacia depois da construção de Sobradinho. Espera-se que os resultados contribuam para a literatura, fornecendo novos aspectos das alterações hidrológicas causadas pelas atividades humanas que podem ser usados para melhorar a modelagem e previsão meteorológica e hidrológica para auxiliar na tomada de decisão frente a possíveis desastres naturais e na gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: Barragem; Vazão; CRP; RQA; OPRP.

Abstract

The objective of this work is to investigate the nature of the hydrological processes of the São Francisco River basin, and the influence of the Sobradinho dam (BA). In order to detect possible hydrological alterations caused by the construction of this dam, daily streamflow and precipitation data from 1929 to 2009. The data are provided by the National Water Agency (ANA). The Recurrence Plot (RP) method, its bivariate extension, the Cross Recurrence Plot (CRP) and its modification, the Ordinal Pattern Recurrence Graph (OPRP), as well as the Recurrence Quantification Analysis (RQA) were used to analyze the non-linear dynamics of streamflow series. The visual analysis of the RP/OPRP patterns and the corresponding set of quantitative measures obtained by the RQA indicate that the operation of the reservoir induced changes in the downstream flow (recorded at the Juazeiro station) towards a less predictable and less stable regime, while the flow dynamics upstream (at the San Francisco station) remained unchanged. The temporal evolution of RQA quantifiers (obtained by applying OPRP in sliding windows) identified the influence of the Três Marias dam on the downstream of São Francisco station. Both dams induced the same downstream flow changes, with a greater degree of change for the Juazeiro station due to the shorter distance from the upstream dam. The OPRP sliding window technique showed sensitivity regarding the dam operation and also the damping process with increasing distance between the dam and the downstream hydrological stations. For the period before construction, the RQA values decrease over time scales, showing that the complexity of the flow dynamics depends on the change in time scale. From the analysis of the relationship between flow and precipitation, it was observed that during the natural regime, flow dynamics were more predictable than precipitation dynamics. The CRP analysis indicated a decrease in synchronization between hydrological processes in the basin after the construction of Sobradinho. The results are expected to contribute to the literature by providing new aspects of hydrological alterations caused by human activities which can be used to improve meteorological and hydrological modeling and forecasting to help with natural disasters and water resource management.

Keywords: Dam; Streamflow; CRP; RQA; OPRP.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, as regiões fisiográficas, barragens e estações fluviométricas. Fonte: (BARRETO et al., 2020).	7
Figura 2 – (a) Segmento da trajetória do espaço de fase do sistema Lorenz (obtido usando os valores dos parâmetros: $r = 28, \sigma = 10, b = 8/3$) utilizando suas três componentes e (b) seu Gráfico de Recorrência correspondente, gerado com $\varepsilon = 5$. Fonte: (MARWAN et al., 2007).	9
Figura 3 – Gráfico de Recorrência. Elaborado no <i>software</i> R Core Team (2023).	13
Figura 4 – Classificação da tipologia do RP: (A) Homogênea (ruído branco igualmente distribuído), (B) Periódica (oscilações harmônicas superpostas), (C) Deriva (mapa logístico alterado com ruído) e (D) Descontínua (movimento browniano). Fonte: (MARWAN et al., 2007).	14
Figura 5 – Padrões ordinais para dimensão $d = 3$. Fonte: (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007).	16
Figura 6 – Séries originais diárias de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	24
Figura 7 – Séries originais diárias de anomalia de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	25
Figura 8 – Séries mensais de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	26
Figura 9 – Séries mensais de anomalia de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	27

Figura 10 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	28
Figura 11 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho. . .	29
Figura 12 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	29
Figura 13 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	30
Figura 14 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	32
Figura 15 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	33
Figura 16 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	33
Figura 17 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	34
Figura 18 – Evolução temporal das medidas de RQA para séries de vazão diária (originais e anomalias) para as estações de Juazeiro e São Francisco calculadas em janelas móveis de 3 anos de duração com o deslocamento de 1 mês.	38

- Figura 19 – Funções de densidade de probabilidade dos índices RQA para séries originais e de anomalias para a estação Juazeiro, calculadas em janelas móveis mostradas na Figura 18. Diferentes cores correspondem aos períodos pré e pós-construção da barragem de Sobradinho. 40
- Figura 20 – Funções de densidade de probabilidade dos índices RQA para séries originais e de anomalias para a estação São Francisco, calculadas em janelas móveis mostradas na Figura 18. Diferentes cores correspondem aos períodos pré e pós-construção da barragem de Sobradinho. 41
- Figura 21 – Séries diárias de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem. 43
- Figura 22 – Séries semanais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem. 43
- Figura 23 – Séries mensais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem. 44
- Figura 24 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries diárias da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho. 45
- Figura 25 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries semanais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho. 45
- Figura 26 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho. 46

Figura 27 – Séries mensais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	48
Figura 28 – Séries mensais de precipitação e precipitação normalizada na bacia do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.	49
Figura 29 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	50
Figura 30 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da precipitação do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	50
Figura 31 – Gráficos de Recorrência Cruzada (CRP) das séries mensais da vazão e precipitação do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	51

Lista de tabelas

Tabela 1	– Caracterização das estações fluviométricas do Rio São Francisco. . . .	20
Tabela 2	– Descrição da barragem e reservatório Sobradinho.	21
Tabela 3	– Parâmetros do RP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries mensais de vazão e de anomalia da vazão do Rio São Francisco nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	28
Tabela 4	– Parâmetros para a análise de Quantificação de Recorrência (RQA) das séries mensais de vazão e de anomalia de vazão do Rio São Francisco no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) à construção da barragem de Sobradinho.	31
Tabela 5	– Análise de Quantificação de Recorrência (OPRQA) das séries mensais de vazão e de anomalias de vazão do Rio São Francisco no período antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	35
Tabela 6	– Parâmetros do RP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries temporais de vazões normalizados do Rio São Francisco da estação Juazeiro nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	44
Tabela 7	– Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) a construção da barragem de Sobradinho.	47
Tabela 8	– Parâmetros do RP/CRP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries temporais normalizadas de vazão e precipitação da bacia do Rio São Francisco, da estação de Juazeiro, nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.	49
Tabela 9	– Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) da vazão e precipitação do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) a construção da barragem de Sobradinho.	52

Lista de abreviaturas e siglas

$\ \cdot\ $	Norma
ε	Limiar de distância (<i>threshold distance</i>) para a construção do Gráfico de Recorrência
$\Theta(\cdot)$	Função degrau ($\Theta(x) = 1 x > 0; 0 x \leq 0$)
τ	Retardo
ANA	Agência Nacional de Águas
AMI	<i>Average Mutual Information</i> (Informação Mútua Média)
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CRP	<i>Cross Recurrence Plot</i> (Gráfico de Recorrência Cruzada)
<i>DET</i>	Medida de quantificação de recorrência: determinismo
<i>DIV</i>	Medida de quantificação de recorrência: divergência
<i>ENTR</i>	Medida de quantificação de recorrência: entropia
FNN	<i>False Nearest Neighbors</i> (Falsos Vizinhos mais Próximos)
L	Medida de quantificação de recorrência: comprimento médio da linha diagonal
L_{max}	Medida de quantificação de recorrência: comprimento máximo da linha diagonal
l_{min}	Comprimento mínimo pré-definido de uma linha diagonal
<i>LAM</i>	Medida de quantificação de recorrência: laminaridade
LOI	<i>Line of Identity</i> (Linha de Identidade)
m	Dimensão de imersão
N	Comprimento de uma série de dados

N_l	Número total de linhas diagonais
OPRP	<i>Ordinal Pattern Recurrence Plot</i> (Gráfico de Recorrência do Padrão Ordinal)
$P(l)$	Histograma dos comprimentos de linha
$p(l)$	Distribuição de probabilidade para encontrar a linha diagonal de comprimento l
$\mathbb{R}$	Conjunto de números reais
$\mathbf{R}_{ij}(\varepsilon)$	Matriz de recorrência de uma trajetória de espaço de fase, utilizando uma vizinhança de tamanho ε
RP	<i>Recurrence Plot</i> (Gráfico de Recorrência)
RQA	<i>Recurrence Quantification Analysis</i> (Análise de Quantificação de Recorrência)
RR	Medida de quantificação de recorrência: taxa de recorrência
TT	Medida de quantificação de recorrência: tempo de permanência
v_{min}	Comprimento mínimo pré-definido de uma linha vertical

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão da Literatura	4
2.1	Bacia Hidrográfica e Processos Hidrológicos	4
2.1.1	Bacias Hidrográficas	4
2.1.2	Processos hidrológicos	5
2.1.3	Bacia do Rio São Francisco	6
2.1.3.1	Barragem e reservatório Sobradinho	7
2.2	O método Gráfico de Recorrência e a Análise de Quantificação de Recorrência	8
2.2.1	Gráfico de Recorrência	8
2.2.1.1	Estrutura do RP	14
2.2.2	Gráfico de Recorrência do Padrão Ordinal	16
2.2.3	Gráfico de Recorrência Cruzada	17
2.2.4	Análise de Quantificação de Recorrência	17
3	Metodologia	20
3.1	Descrição dos Dados	20
3.2	Metodologia	21
3.2.1	O <i>Software</i> utilizado	23
4	Resultados	24
4.1	Comparação entre o Gráfico de Recorrência e o Gráfico de Recorrência dos Padrões Ordinais	26
4.1.1	Gráfico de Recorrência (RP)	27
4.1.2	Gráfico de Recorrência de Padrões Ordinais (OPRP)	32
4.2	Gráfico de Recorrência da vazão nas diferentes escalas temporais.	42
4.3	Gráfico de Recorrência Cruzada entre a vazão e a precipitação.	47
5	Conclusão	53
	Referências Bibliográficas	55

1 Introdução

O uso sustentável dos recursos de água doce é um dos maiores desafios do século XXI (PFIRMAN, 2003). As mudanças climáticas e as práticas humanas, como o uso da água para produção de energia e irrigação, podem alterar gravemente o regime hidrológico, a saúde ecológica e a diversidade biológica da zona ribeirinha (CHRISTENSEN et al., 2004; ZHANG et al., 2016; WU et al., 2019). A construção de barragens bem como a operação de seus reservatórios tem grande impacto no regime hidrológico, incluindo conectividade hidrológica (KONDOLF et al., 2006), variabilidade temporal do fluxo do rio (JALÓN; TÁNAGO; JALÓN, 2019), mudanças no transporte de sedimentos (GUPTA; KAO; DAI, 2012) e a qualidade da água (WEI et al., 2009). A restauração total do regime de fluxo natural só é possível com a remoção completa da barragem, o que na maioria dos casos é uma tarefa impossível. Porém, a operação da barragem pode ser modificada de forma a produzir um fluxo que se assemelhe ao regime de fluxo natural e ao mesmo tempo preservar os principais serviços da barragem (RICHTER; THOMAS, 2007).

A análise empírica dos dados de vazão antes e depois da construção da barragem pode fornecer informações valiosas sobre o grau de alteração do fluxo natural. Tradicionalmente isso foi feito usando métodos estatísticos clássicos (BOTTER et al., 2010; HWANG et al., 2021) e métodos que incluem aspectos ecológicos através do conjunto de indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes (RICHTER; THOMAS, 2007; ELY et al., 2020). No entanto, esses modelos são incapazes de capturar a natureza não estacionária e não linear das séries hidrológicas, o que pode levar a uma precisão e confiabilidade limitadas dos resultados (SHU; JESSON; STERLING, 2021; NOURANI; KISI; KOMASI, 2011).

Dada a limitação dos métodos tradicionais, reconheceu-se que as características de vazão que refletem a complexidade dos sistemas hidrológicos também devem ser incluídas como um aspecto da alteração hidrológica. Essas propriedades incluem fractais e multifractais (ZHOU; ZHANG; SINGH, 2014; STRATIMIROVIC et al., 2021), caos determinístico (OGUNJO et al., 2022), teoria da informação (BARRETO et al., 2020) e estrutura de rede (HAN et al., 2018).

Neste trabalho, investiga-se o potencial do método de Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* – RQA) em estudos hidrológicos, particularmente para detectar alterações hidrológicas causadas pela construção de barragens e reservatórios. O método RQA consiste no cálculo de vários índices que descrevem a

topologia do Gráfico de Recorrência (*Recurrence Plot* - RP) introduzido por Eckmann, Kamphorst e Ruelle (1987), como um método gráfico para visualizar as recorrências dos estados de um sistema dinâmico. RPs são simples para interpretações, requerem apenas a série temporal medida e seus recursos gráficos fornecem uma boa visão da natureza do processo subjacente, mesmo para séries temporais curtas, além de não require suposições sobre estacionariedade, distribuição estatística e número mínimo de observações (BASTOS; CAIADO, 2011).

Desde que foram introduzidos, há mais de três décadas, RP e RQA têm sido usados com sucesso na análise de séries temporais em Fisiologia (ZBILUT; THOMASSON; WEBBER, 2002; GRUSZCZYŃSKA et al., 2019), Geofísica (DONNER et al., 2019), Ecologia (SEMERARO et al., 2020; ALMEIDA-ÑAUÑAY et al., 2022), Meteorologia (YAN et al., 2021), Física Solar (ZOLOTOVA; PONYAVIN, 2006), Engenharia (PETRAUSKIENE et al., 2022; YANG et al., 2015) e Finanças (BASTOS; CAIADO, 2011; STROZZI; ZALDÍVAR; ZBILUT, 2002; CHEN; LIN, 2022). No entanto, existem poucas aplicações do RP em hidrologia, incluindo Vazão (BANERJEE et al., 2021; WENDI; MERZ; MARWAN, 2019; FRAGKOU et al., 2022) e Precipitação (SHU; JESSON; STERLING, 2021; SHU et al., 2021; MUKHERJEE, 2021).

Neste trabalho, investigam-se as alterações hidrológicas na bacia do rio São Francisco (SF) causadas pela construção da barragem e reservatório Sobradinho. A barragem está localizada na região submédica da bacia que está exposta a secas frequentes e prolongadas, e à escassez de água devido ao clima semiárido. Estudos anteriores sobre hidrologia do SF foram baseados em métodos estatísticos e incluem a análise de precipitação (BEZERRA et al., 2019; SANTOS; MORAIS, 2013; SANTOS et al., 2018), índices de seca (PAREDES-TREJO et al., 2021; SANTOS et al., 2017; FREITAS et al., 2022) e vazão (LUCAS et al., 2020; ARAUJO; CELESTE, 2019; LIMA et al., 2022). Também foram estudadas as alterações de fluxo do rio causadas pela atividade humana (SANTOS; POMPEU; KENJI, 2012; VASCO; NETTO; SILVA, 2019).

A contribuição deste trabalho para o estudo das alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco encontra-se na análise da complexidade e não linearidade dos regimes de vazão e precipitação revelados por meio da topologia do Gráfico de Recorrência (RP) e seus índices quantitativos calculados com Análise de Quantificação de Recorrência (RQA).

O RP foi aplicado em sua forma original (baseando as recorrências em “distância” entre os estados do sistema dinâmico, que contêm a informação sobre os valores das séries), em sua extensão bivariada Gráfico de Recorrência Cruzada (*Cross Recurrence Plot* - CRP) para analisar a similaridade dos dois sistemas dinâmicos (vazão e precipitação).

RP é baseado no critério de proximidade de pontos em uma trajetória de espaço

de fase. O limiar ε deve ser cuidadosamente escolhido, pois, se um ε for muito pequeno resulta em um RP vazio, enquanto que, se ε for muito grande resulta em um RP cheio de pontos de recorrência. Em ambos os casos, o RP falhará em fornecer as informações sobre a estrutura de recorrência do sistema subjacente (MARWAN et al., 2007). Por essa razão se aplica sua modificação Gráfico de Recorrência de Padrões Ordinais (*Order Patterns Recurrence Plot* – OPRP) em que as recorrências são definidas como repetição de estados – padrões ordinais que contêm a informação sobre a ordenação local dos valores da série, descartando a escolha de um limiar. Sua principal vantagem é a robustez bem expressa contra a não estacionariedade (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007).

O objetivo geral desta tese é investigar, por uso de métodos da análise dos sistemas complexos, a natureza dos processos hidrológicos da bacia do Rio São Francisco e a influência da atividade humana.

Objetivos específicos foram:

- (i) Utilizar os métodos Gráfico de Recorrência (RP) e Gráfico de Recorrência de Padrões Ordinais (OPRP) para investigar a influência da construção do reservatório Sobradinho na dinâmica de vazão na bacia do Rio São Francisco.
- (ii) Comparar os índices da Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) das séries de vazão em diferentes escalas temporais para períodos anterior e posterior à construção da barragem Sobradinho.
- (iii) Utilizar o método Gráfico de Recorrência Cruzada (CRP) para investigar a influência da construção do reservatório Sobradinho na relação entre os processos hidrológicos vazão e precipitação na bacia do Rio São Francisco.

Esta tese está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda a revisão da literatura sobre o fenômeno e a fundamentação teórica das técnicas utilizadas. No Capítulo 3 são descritos os dados utilizados para análise e a metodologia empregada. Os resultados e a discussão são mostrados no Capítulo 4. As conclusões e a proposta para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

2 Revisão da Literatura

2.1 Bacia Hidrográfica e Processos Hidrológicos

Esta seção traz uma breve revisão sobre bacias hidrográficas, processos hidrológicos e a bacia do Rio São Francisco.

2.1.1 Bacias Hidrográficas

Uma bacia hidrográfica, também chamada de bacia de captação ou bacia de drenagem, é definida como uma área em que toda a água que entra nela vai para uma saída comum (WANI; GARG, 2009); ou seja, é uma área geográfica natural restrita pelos locais mais altos do relevo (espigões, divisores de água), dentro dos quais a água descendente das chuvas é escoada superficialmente por um curso d'água principal até sua saída da bacia, no ponto mais baixo do relevo, denominado foz ou exutório (SANTANA, 2003).

O rio principal de uma bacia é o maior curso de água que conecta uma nascente ao exutório. Os rios secundários que levam suas águas diretamente ao rio principal são denominados afluentes (BERNARDI et al., 2012). Cada riacho, afluente ou rio está associado a uma bacia hidrográfica, e pequenas bacias se associam para se tornarem uma bacia maior. A ordem do fluxo, ou curso de água, é medida pelo grau de ramificação de cursos dentro de uma bacia hidrográfica. Cada volume de fluxo de água é identificado por sua ordem. A cabeceira ou o início de um rio é denominado rio de primeira ordem. Em seguida, os rios de primeira ordem se encontram e formam um rio de segunda ordem. Os cursos de água de segunda ordem formam um rio de terceira ordem. A ordem do rio descreve a localização referente ao alcance da bacia hidrográfica é útil para compreender a quantidade e a qualidade da água disponível no alcance e também é usada como critério para dividir a bacia hidrográfica maior em uma unidade menor. Além disso, os critérios de seleção da dimensão da bacia hidrográfica dependem dos objetivos do desenvolvimento e da inclinação do terreno (WANI; GARG, 2009).

Bacias hidrográficas são componentes essenciais de um ecossistema saudável. As bacias funcionam como um filtro para o escoamento que ocorre a partir da precipitação ou da neve, fornecendo então água limpa para beber, para a irrigação e para a indústria. Elas também oferecem uma variedade de vegetação e vida selvagem. As atividades humanas, bem como os eventos naturais que ocorrem numa bacia hidrográfica, podem prejudicar a

qualidade da água em todo o sistema. De acordo com Gilland et al. (2009), cientistas e líderes governamentais reconhecem que a melhor forma de proteger os recursos hídricos é compreendê-los e geri-los numa bacia hidrográfica, assim extraindo informações relevantes para sua prevenção, diagnóstico de risco ambiental e mudanças em processos físicos e químicos. Para o gerenciamento de recursos hídricos existem fundamentos, objetivos, diretrizes criados pela Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de janeiro de 1997.

No Brasil existem diversas bacias hidrográficas com reservatórios que se destacam pela sua capacidade de armazenamento de energia, como: Rio Amazonas, Rio São Francisco, Rio Uruguai, Rio Iguaçu, Rio Tocantins, Rio Tietê, Rio Paranaíba, Rio Grande entre outras (ONS, 2023).

2.1.2 Processos hidrológicos

O ciclo hidrológico é o fluxo que a água exerce entre a atmosfera, os oceanos e os continentes, e os processos hidrológicos representam todas as formas de movimentação da água no meio ambiente. A precipitação, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração são exemplos de processos verticais, o escoamento superficial e subterrâneo são exemplos de processos longitudinais (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012; TUCCI; CLARKE, 1997).

O processo hidrológico de uma bacia hidrográfica está em função de seus padrões morfológicos, isto é, área, forma, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal, etc (LIMA, 2008). Por isso, seus padrões têm um papel relevante nos processos do ciclo hidrológico, atuando na infiltração, na quantidade de água produzida, na evapotranspiração (evaporação + transpiração) e os escoamentos superficial e sub-superficial (TONELLO et al., 2006; TUCCI; CLARKE, 1997).

Os processos hidrológicos sofrem impactos das mudanças climáticas, como também das ações antropogênicas, tais como: irrigação, desmatamento, drenagem de áreas úmidas e construção de barragens (SERPA et al., 2015; PALMER et al., 2008; SAHAGIAN, 2000; MAGILLIGAN; NISLOW, 2005). As barragens fornecem fonte de energia renovável, água para irrigação e proteção contra inundações, mas a operação de barragens também induz alterações no regime hidrológico (tais como magnitude, frequência e tempo de vazões baixos e altas, qualidade da água, regime térmico e transporte de sedimentos) que podem ter consequências graves na ecologia e diversidade biológica dos sistemas aquáticos e ribeirinhos (MAGILLIGAN; NISLOW, 2005; POFF et al., 2007). A saúde ecológica das bacias hidrográficas pode ser preservada através da modificação do funcionamento das barragens de modo a produzir uma vazão semelhante ao regime de fluxo natural

(RICHTER; THOMAS, 2007).

2.1.3 Bacia do Rio São Francisco

A bacia do Rio São Francisco é a terceira maior bacia do Brasil, atrás da bacia do Rio Amazonas e da bacia do Rio Paraná (STOSIC et al., 2016). A bacia hidrográfica do Rio São Francisco equivale a 8% do território brasileiro, com extensão de 2863 km. Abrange uma área de drenagem de mais de 639,219 km², desde da nascente na serra da Canastra/MG até o desaguardo no oceano Atlântico, entre os limites dos estados de Sergipe e Alagoas. Essa área está localizada nas regiões Nordeste e Sudeste do país, passando por 505 municípios, seis estados (Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas), mais o Distrito Federal. É dividida em quatro zonas, ou regiões fisiográficas: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. Com uma população de aproximadamente 15 milhões de habitantes (predominantemente urbana), a maior parte se encontra no Alto São Francisco. Em torno de 54% do território da bacia hidrográfica se localiza no semiárido, com registro de períodos críticos de estiagem. Mas a diversidade ambiental é abrangente, perpassa por diversos biomas: mata atlântica, cerrado, caatinga, costeiros e insulares (CBHSF, 2024).

O clima apresenta uma variabilidade que está ligada à mudança do úmido para o árido, com temperatura média anual entre 18 e 27 °C. A pluviosidade tem média anual de 1.036 mm, sendo que a precipitação anual varia de 1400 mm, na nascente do rio, até 350 mm, entre Sento Sé e Paulo Afonso, na Bahia. Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro, e os mais secos, de junho a agosto. Mais de 70% das demandas de água na bacia são utilizados para a irrigação, com maior concentração no Médio e Submédio São Francisco (CBHSF, 2024).

Ao longo da bacia do Rio São Francisco existe várias barragens/reservatórios, para controle de sua vazão e/ou geração de energia hidroelétrica, encontram-se: Três Marias em Minas Gerais, Sobradinho, Paulo Afonso I, II, III e IV na Bahia, Luiz Gonzaga em Pernambuco, Moxotó em Alagoas e Xingó, localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe, construídos entre 1962 (Três Marias) a 1994 (Xingó). Os reservatórios com maior capacidade de armazenamento são: Sobradinho (34.116 Hm³), Três Marias (19.459 Hm³), Luiz Gonzaga (10.782 Hm³) e Xingó (3.800 Hm³). E as maiores usinas hidrelétricas são: Xingó (3.162 MW), Paulo Afonso IV (2.462,4 MW), Luiz Gonzaga (1.479,6 MW) e Sobradinho (1.050,3 MW) (CHESF, 2024; CEMIG, 2024; CBHSF, 2024). A Figura 1 mostra a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, onde se observa a divisão das quatro regiões fisiográficas (Alto, Médio, Submédio, Baixo), a localização dos reservatórios e as estações fluviométricas.

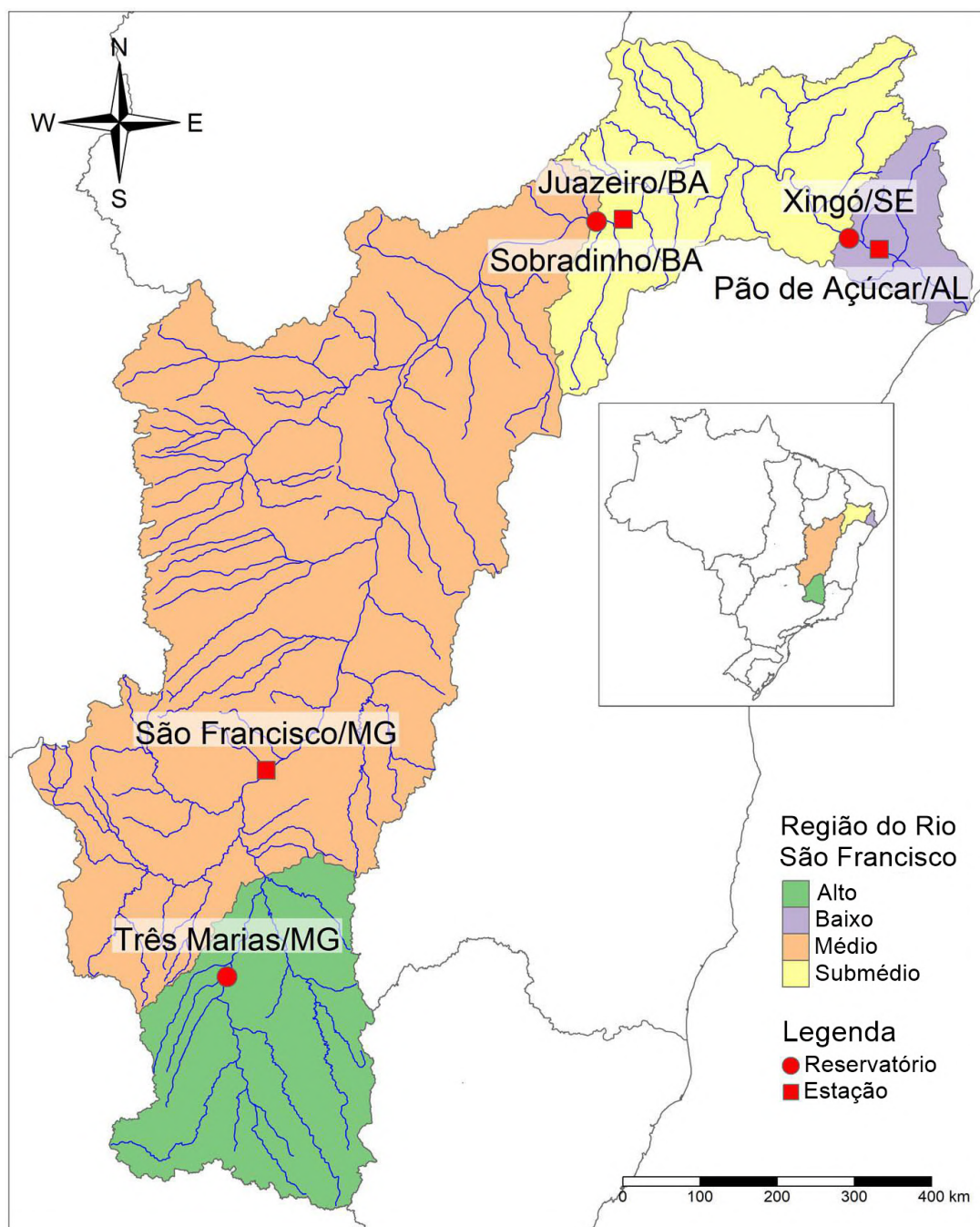


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, as regiões fisiográficas, barragens e estações fluviométricas. Fonte: (BARRETO et al., 2020).

2.1.3.1 Barragem e reservatório Sobradinho

Localizada no estado da Bahia, a 747,80 km da foz do Rio São Francisco, a barragem Sobradinho serve como fonte regularizadora principal dos recursos hidrológicos da região, além de desempenhar a função de gerar energia elétrica. Embora sua construção tenha sido iniciada em 1973, as operações da barragem começaram apenas no final de 1979. O

reservatório tem um comprimento de cerca de 320 km, possui uma superfície de espelho d'água de $4,214 \text{ km}^2$ e uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 392,50 m, o que o torna o maior lago artificial do mundo. Isso assegura, juntamente com o reservatório de Três Marias/CEMIG, uma vazão regularizada de $2,060 \text{ m}^3/\text{s}$ nos períodos de estiagem, permitindo o funcionamento de todas as usinas da CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) localizadas ao longo do Rio São Francisco. O reservatório tem o total de 1.050,3 MW de potência instalada (CHESF, 2024).

2.2 O método Gráfico de Recorrência e a Análise de Quantificação de Recorrência

Nesta seção, serão apresentados os métodos Gráfico de Recorrência, Gráfico de Recorrência do Padrão Ordinal, Gráfico de Recorrência Cruzada e a Análise de Quantificação de Recorrência.

2.2.1 Gráfico de Recorrência

Como o próprio nome sugere, o conceito básico da análise de recorrência é a recorrência, repetição de elementos ou padrões numa sequência (WALLOT, 2019). Eckmann, Kamphorst e Ruelle (1987) desenvolveram o conceito de recorrência para a análise de séries de dados denominada Gráfico de Recorrência (*Recurrence Plot* - RP); isto é, uma ferramenta que serve para visualizar padrões recorrentes que acontecem em um espaço de fase m -dimensional dentro de um raio de vizinhança em momentos diferentes i e j (MOCENNI; FACCHINI; VICINO, 2011).

O espaço de fase é uma representação gráfica das variáveis necessárias para especificar o estado sistema dinâmico a qualquer momento (SIVAKUMAR; WOLDEMESKEL; PUENTE, 2014; SHU et al., 2021). Os elementos ou pontos no espaço de fase retratam as possíveis situações do sistema em um determinado instante de tempo, sua evolução temporal é representada por uma trajetória (uma curva contínua ou uma sequência de pontos, para um sistema dinâmico contínuo ou discreto, respectivamente) (MARWAN et al., 2007).

Os espaços de fase com dimensões superiores a três podem ser visualizados só por projeções nos subespaços bidimensionais ou tridimensionais. O Gráfico de Recorrência é uma ferramenta capaz de investigar a trajetória de um espaço de fase m -dimensional pela apresentação bidimensional de suas recorrências. Um exemplo ilustrativo deste conceito é

mostrado na Figura 2, em que se tem um segmento de trajetória no espaço de fase de um sistema dinâmico bem conhecido, o sistema de Lorenz na Figura 2(a) e seu Gráfico de Recorrência correspondente na Figura 2(b) (MARWAN, 2003).

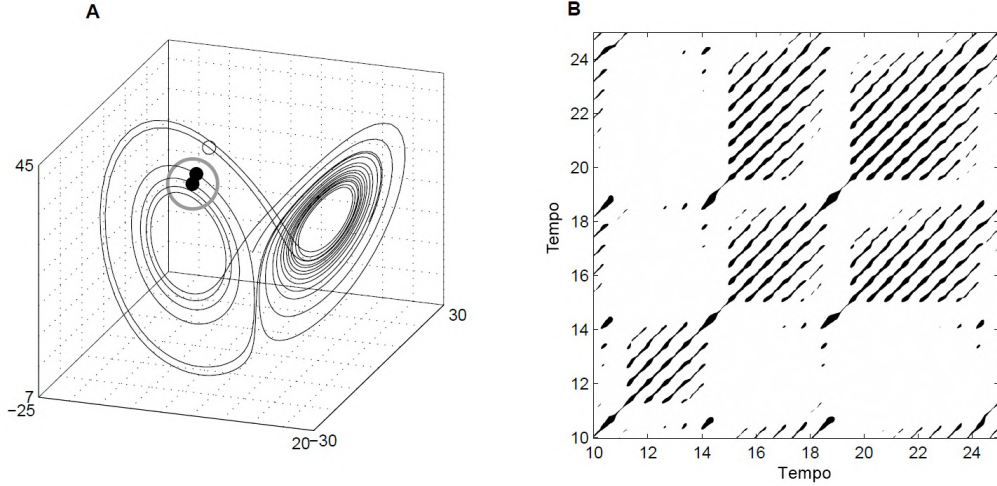


Figura 2 – (a) Segmento da trajetória do espaço de fase do sistema Lorenz (obtido usando os valores dos parâmetros: $r = 28, \sigma = 10, b = 8/3$) utilizando suas três componentes e (b) seu Gráfico de Recorrência correspondente, gerado com $\varepsilon = 5$. Fonte: (MARWAN et al., 2007).

Cada ponto localizado na posição (i, j) do RP (Figura 2(b)) está associado a um o ponto da trajetória no instante j que está dentro da vizinhança (círculo cinza) de um determinado ponto marcado no instante i (ponto preto na trajetória) e corresponde a um ponto de recorrência (ponto preto no RP). Já um ponto fora dessa vizinhança (círculo pequeno na Figura 2 (a)) fornece, por sua vez, um ponto branco no RP (Figura 2(b)). O raio da vizinhança é definido pelo limiar ε , que será descrito mais adiante.

O RP expressa uma matriz quadrada bidimensional com uns e zeros indicando a ocorrência (1) ou não (0) de estados recorrentes no sistema (MOCENNI; FACCHINI; VICINO, 2011). A evolução temporal de um sistema dinâmico pode ser matematicamente expressada por uma trajetória $\vec{x}_i \in \mathbb{R}^d$ ($i = 1, \dots, N$) no espaço de fase m -dimensional,

$$\mathbf{R}_{ij}(\varepsilon) = \Theta \left(\varepsilon - \left\| \vec{x}_i - \vec{x}_j \right\| \right), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{R}_{ij}(\varepsilon)$ é o elemento da matriz de recorrência bidimensional, $\Theta(\cdot)$ a função degrau ($\Theta(x) = 0$, se $x < 0$ e $\Theta(x) = 1$ c.c.), ε é o limiar de distância (*threshold distance*), ou seja, o raio em torno do ponto de trajetória no qual os estados vizinhos dentro do raio são considerados recorrente, $\|\cdot\|$ é a norma, as mais utilizadas: a norma mínima, a máxima e a

euclidiana, $\vec{x}_i$ e $\vec{x}_j$ localização do ponto no espaço de fase em que o sistema se encontra nos momentos i e j respectivamente e N o número de pontos medidos por $\vec{x}_i$ e $\vec{x}_j$ (MARWAN et al., 2007).

O RP é construído com base no critério de proximidade de pontos em uma trajetória de espaço de fase: pontos de recorrência caem na vizinhança de tamanho ε . O limite ε deve ser escolhido com cuidado, porque se ε for muito pequeno o RP fica vazio, ou seja, não há pontos de recorrência ou apenas alguns, enquanto que, se ε for muito grande o RP terá alta densidade de pontos de recorrência, isto é, quase todos os pontos serão vizinhos de todos os outros pontos. Em ambos os casos, o RP falhará em fornecer as informações sobre a estrutura de recorrência do sistema subjacente (MARWAN et al., 2007). Várias “regras práticas” para escolher o limite ε foram propostas: alguns percentuais do diâmetro máximo do espaço de fase (MINDLIN; GILMORE, 1992), um valor que não deve exceder 10% da média ou do diâmetro máximo do espaço de fase (ZBILUT; WEBBER-JR, 1992), ou um valor que garanta uma densidade de pontos de recorrência de aproximadamente 1% (ZBILUT; ZALDIVAR-COMENGES; STROZZI, 2002). Ou ainda, um limiar que produza uma porcentagem de pontos de recorrência entre 1% e 5% (WEBBER-JR; ZBILUT, 2005).

Tem-se que $\mathbf{R}_{ii} = 1 \mid_{i=1}^N$, por definição, logo o RP terá sempre uma linha diagonal principal, chamada de linha de identidade (*Line of identity* - LOI), onde é formada inteiramente por pontos de recorrência. E por definição, o RP é simétrico em relação a LOI, isto é, $\mathbf{R}_{ij} = \mathbf{R}_{ji}$ (MARWAN et al., 2007).

O Gráfico de Recorrência permite a análise multidimensional de um espaço de fase sem a necessidade de visualização de suas projeções. Para contrastar, uma série temporal consiste num conjunto de dados para a qual apenas duas variáveis são conhecidas: a que descreve o fenômeno estudado e a variável relacionada com o tempo. Portanto, como as outras variáveis do sistema são desconhecidas, os dados são reportados de uma forma unidimensional, representando um sistema dinâmico multidimensional. A fim de recuperar as outras dimensões do espaço de fase do sistema que uma série temporal representa, é necessário partir de grandezas unidimensionais. De acordo com o Teorema de Imersão de Takens, isto pode ser feito utilizando o método de reconstrução do espaço de fase por imersão com retardo (TAKENS, 1981). O método implica que, ao cruzar esta série contra si mesma com um certo atraso, é possível recuperar a dinâmica multidimensional de uma série temporal unidimensional (WALLOT, 2017).

A reconstrução do espaço de fase de um sistema dinâmico é realizada mediante o conhecimento de dois importantes parâmetros: a dimensão de imersão (m) e o retardo (τ). A dimensão de imersão m representa o número de variáveis independentes necessárias para caracterização da dinâmica do sistema e pode ser estimado pelo Método de Falsos Vizinhos

mais Próximos (*False Nearest Neighbors* - FNN) (KENNEL; BROWN; ABARBANEL, 1992). A ideia básica é que, ao diminuir a dimensão, uma quantidade crescente de pontos no espaço de fase será projetada na vizinhança de qualquer ponto no espaço de fase, mesmo que não sejam vizinhos reais. Esses pontos são chamados de falsos vizinhos mais próximos. Usa-se a quantidade desses falsos vizinhos na função da dimensão de incorporação para encontrar a dimensão mínima de incorporação, onde os falsos vizinhos desaparecem (MARWAN, 2003; KANTZ; SCHREIBER, 2004).

O retardo τ representa o mínimo *time lag* para minimizar a autocorrelação na série temporal. Ele pode ser estimado usando a Método de Informação Mútua (*Average Mutual Information* - AMI) (FRASER; SWINNEY, 1986). A informação mútua média é a média da informação sobre um valor após um atraso τ , que pode ser obtida a partir do conhecimento do valor atual (MARWAN, 2003). Na prática, não se busca o mínimo global na informação mútua média, mas sim um mínimo local no qual a função de informação mútua média tenha diminuído consideravelmente e permanece relativamente constante a partir de então (WALLOT, 2017).

Para mostrar como é realizada a reconstrução do espaço de fase de um sistema dinâmico a partir de uma série temporal (ou sequência dos valores observados)

$$\vec{b} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n), \quad (2.2)$$

onde $\vec{b}$ é um vetor com valores de b_1 a b_n representando a série temporal ou a sequência, primeiro determinam-se a dimensão de imersão (m) e o retardo (τ). Uma vez os valores desses parâmetros para a série analisada, seu espaço de fase m -dimensional pode ser reconstruído. Os vetores de estado $\vec{x}_i$ (ou coordenadas) que irão compor o espaço de fase reconstruído são formados de acordo com a seguinte regra: uma dada coordenada $\vec{x}_i$ é formada tomando-se m vezes os valores de $\vec{b}$, todos espaçados entre si por intervalos de τ , tendo como primeira componente o elemento b_i , e o último, $b_{i+(m-1)\tau}$ (que garante a quantidade máxima de m elementos) (WALLOT, 2017):

$$\vec{x}_i = (b_i, b_{i+\tau}, b_{i+2\tau}, \dots, b_{i+(m-1)\tau}), \quad i = 1, 2, \dots, n - (m - 1). \quad (2.3)$$

Todos os possíveis vetores de estado, $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_{n-(m-1)\tau}$, são arranjados na matriz descrita em 2.4:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_{n-(m-1)\tau} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & b_{1+\tau} & \cdots & b_{1+(m-1)\tau} \\ b_2 & b_{2+\tau} & \cdots & b_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n-(m-1)\tau} & b_{n-(m-2)\tau} & \cdots & b_n \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde, o índice de linha é uma medida de tempo e cada índice de coluna corresponde a uma dimensão no espaço de fase. Como exemplo ilustrativo, considere-se a sequência de dados $\vec{b} = (1, 3, 2, 1, 2)$, utilizando $m = 3, \tau = 1$ e $\varepsilon = 2$. Assim

$$\begin{aligned} \vec{x}_1 &= b_1, b_2, b_3 = 1, 3, 2 \\ \vec{x}_2 &= b_2, b_3, b_4 = 3, 2, 1 \\ \vec{x}_3 &= b_3, b_4, b_5 = 2, 1, 2 \end{aligned}$$

Aplicando a equação do RP, usando $||\cdot||$ norma euclidiana, tem-se:

$$\mathbf{R}_{ij}(\varepsilon) = \Theta \left(\varepsilon - \left\| \vec{x}_i - \vec{x}_j \right\| \right) \implies$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{11}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{(1-1)^2 + (3-3)^2 + (2-2)^2} \right) \\ \mathbf{R}_{11}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{0} \right) \\ \mathbf{R}_{11}(\varepsilon) &= \Theta(2) \\ \mathbf{R}_{11}(\varepsilon) &= 1. \text{ Logo, ponto recorrente;} \end{aligned}$$

e assim por diante.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{12}(\varepsilon) &= \mathbf{R}_{21}(\varepsilon) \\ \mathbf{R}_{12}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{(1-3)^2 + (3-2)^2 + (2-1)^2} \right) \\ \mathbf{R}_{12}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{6} \right) \\ \mathbf{R}_{12}(\varepsilon) &= \Theta(2 - 2,45) < 0. \text{ Logo, ponto não recorrente;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{13}(\varepsilon) &= \mathbf{R}_{31}(\varepsilon) \\ \mathbf{R}_{13}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{(1-2)^2 + (3-1)^2 + (2-2)^2} \right) \\ \mathbf{R}_{13}(\varepsilon) &= \Theta \left(2 - \sqrt{5} \right) \\ \mathbf{R}_{13}(\varepsilon) &= \Theta(2 - 2,24) < 0. \text{ Logo, ponto não recorrente;} \end{aligned}$$

$$\mathbf{R}_{22}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{(3-3)^2 + (2-2)^2 + (1-1)^2} \right)$$

$$\mathbf{R}_{22}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{0} \right)$$

$$\mathbf{R}_{22}(\varepsilon) = \Theta(2) = 1. \text{ Logo, ponto recorrente;}$$

$$\mathbf{R}_{23}(\varepsilon) = \mathbf{R}_{32}(\varepsilon)$$

$$\mathbf{R}_{23}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{(3-2)^2 + (2-1)^2 + (1-2)^2} \right)$$

$$\mathbf{R}_{23}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{3} \right)$$

$$\mathbf{R}_{23}(\varepsilon) = \Theta(2-1,73) = 1. \text{ Logo, ponto recorrente;}$$

$$\mathbf{R}_{33}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{(2-2)^2 + (1-1)^2 + (2-2)^2} \right)$$

$$\mathbf{R}_{33}(\varepsilon) = \Theta \left(2 - \sqrt{0} \right)$$

$$\mathbf{R}_{33}(\varepsilon) = \Theta(2) = 1. \text{ Logo, ponto recorrente;}$$

A matriz de recorrência será, portanto

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{R}_{23} \\ \mathbf{R}_{11} & \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{13} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

o que resulta no RP da Figura 3

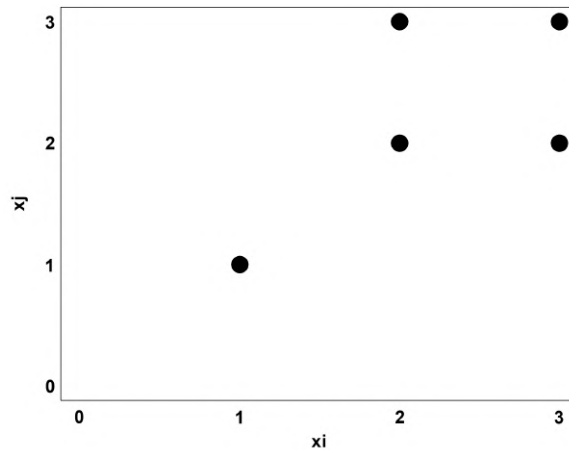


Figura 3 – Gráfico de Recorrência. Elaborado no *software* R Core Team (2023).

2.2.1.1 Estrutura do RP

Os RPs oferecem informações relevantes sobre a evolução temporal dessas trajetórias, pois, padrões típicos de RPs estão conectados a um comportamento específico do sistema. Os RPs são classificados em duas categorias: grande escala, ou tipologia (*typology*) e pequena escala, ou textura (*texture*). A tipologia apresenta uma imagem global do RP e pode ser caracterizada como Homogênea, Periódica, Deriva (*drift*) e Descontínua (*disrupted*) (ECKMANN; KAMPHORST; RUELLE, 1987; MARWAN, 2003; MARWAN et al., 2007), conforme ilustrado na Figura 4 e descrito a seguir.

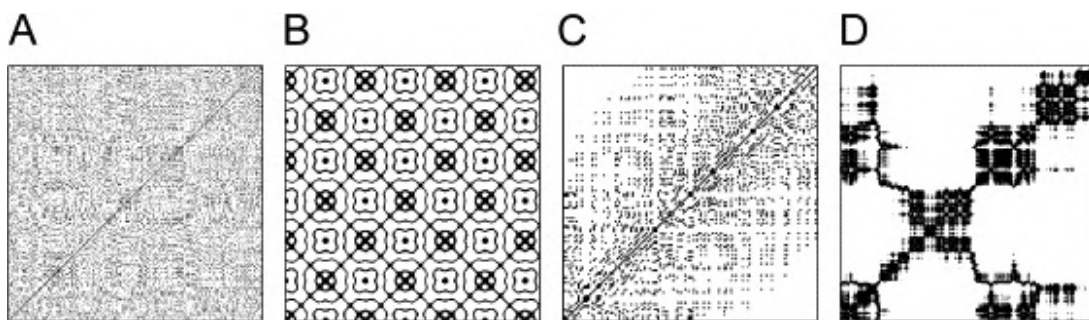


Figura 4 – Classificação da tipologia do RP: (A) Homogênea (ruído branco igualmente distribuído), (B) Periódica (oscilações harmônicas superpostas), (C) Deriva (mapa logístico alterado com ruído) e (D) Descontínua (movimento browniano). Fonte: (MARWAN et al., 2007).

Descrição das tipologias do RP:

- **Homogêneo**(Figura 4(A)): são específicos de sistemas estacionários e autônomos, onde as linhas diagonais (trajetórias) são curtas em comparação ao RP como todo, apresentando assim, pontos pequenos isolados. Um exemplo de RP com essa tipologia é uma série temporal aleatória;
- **Periódica**(Figura 4(B)): exibem linhas diagonais (paralelas à LOI) completamente preenchidas, com aparência de tabuleiro de xadrez, e são tipologias características de sistemas oscilantes. O período corresponde à distância vertical (horizontal) entre as linhas diagonais. No caso de sistemas quase periódicos, demonstra diferentes distâncias entre as linhas diagonais;
- **Deriva**(*drift*)(Figura 4(C)): é causado por sistemas que possuem parâmetros que mudam lentamente, isto é, sistemas não estacionários. Essa mudança lenta deixa os cantos superior esquerdo e inferior direito do RP brancos por causa da redução de pontos recorrentes;

- **Descontínua** (*disrupted*) (Figura 4(D)): retrata regiões ou faixas brancas causadas por mudanças repentinas no sistema ou eventos extremos. Essa tipologia oferece uma alternativa fácil de identificar e analisar eventos extremos e raros, utilizando a frequência de suas recorrências.

As estruturas de pequena escala são classificadas em: pontos únicos isolados, linhas diagonais e linhas verticais e horizontais (ECKMANN; KAMPHORST; RUELLE, 1987; MARWAN et al., 2007), conforme descrito a seguir:

- **Pontos de recorrência isolados e únicos:** podem ocorrer quando os estados forem raros, se duram apenas por um breve período de tempo ou se oscilarem vigorosamente;
- **Linhas diagonais** $\mathbf{R}_{i+k,j+k} = 1|_{k=0}^{l-1}$ (onde l é o comprimento da linha diagonal): acontecem quando um segmento de trajetória decorre quase paralelo a outro segmento. Isto é, para unidades de tempo l :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j, \vec{x}_{i+1} \approx \vec{x}_{j+1}, \dots, \vec{x}_{i+l-1} \approx \vec{x}_{j+l-1}.$$

Desse modo, uma linha diagonal de comprimento l é definida por:

$$(1 - \mathbf{R}_{i-1,j-1}) (1 - \mathbf{R}_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} \mathbf{R}_{i+k,j+k} = 1.$$

O comprimento dessa linha diagonal define a duração do tempo de similaridade dos segmentos da trajetória. As linhas diagonais perpendiculares à LOI representam os segmentos paralelos da trajetória que andam com tempos contrários (segmentos espelhados), o que é normalmente uma indicação de imersão inadequada;

- **Linhas verticais (ou horizontais)** $\mathbf{R}_{i,j+k} = 1|_{k=0}^{v-1}$ (onde v é o comprimento da linha): mensura o período de tempo em que o estado não muda, ou muda muito lentamente. Ou seja:

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j, \vec{x}_i \approx \vec{x}_{j+1}, \dots, \vec{x}_i \approx \vec{x}_{j+v-1}.$$

Uma linha vertical de comprimento v é definida por

$$(1 - \mathbf{R}_{i,j-1}) (1 - \mathbf{R}_{i,j+v}) \prod_{k=0}^{v-1} \mathbf{R}_{i,j+k} = 1.$$

Portanto, o estado fica retido por algum tempo. Esse é um comportamento típico dos estados laminares (intermitência).

2.2.2 Gráfico de Recorrência do Padrão Ordinal

Em vez de usar a proximidade espacial entre as trajetórias do espaço de fase, o Gráfico de Recorrência dos Padrões Ordinais (*Ordinal Pattern Recurrence Plot* – OPRP) (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007) baseiam-se na recorrência de padrões ordinais definidos pelo método de simbolização de Bandt e Pompe (2002). Para uma série temporal $\{u_i, i = 1, \dots, N\}$ cada u_i é substituído pela “palavra” $x_i = (u_i, u_{i+\tau}, u_{i+2\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau})$ cujos elementos assumem valores $(0, 1, 2, \dots, d-1)$ de acordo com o *rank* dos valores $u_i, u_{i+\tau}, u_{i+2\tau}, \dots, u_{i+(d-1)\tau}$, em ordem crescente, cada x_i é representado pela sequência π_i que corresponde a $d!$ permutações de sequência $(0, 1, 2, \dots, d-1)$ (BANDT; POMPE, 2002).

A dimensão de imersão d e o retardo τ são obtidos como no RP. O critério de recorrência que define se o elemento de OPRP é um ponto preto (recorrência) ou ponto branco (não recorrência), dado por (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007)

$$\mathbf{R}_{i,j}(d) = \begin{cases} 1 & : \pi_i = \pi_j \\ 0 & : \text{c.c} \end{cases}, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (2.5)$$

Um exemplo de construção de padrões ordinais com $d = 3$ é apresentado na Figura 5.

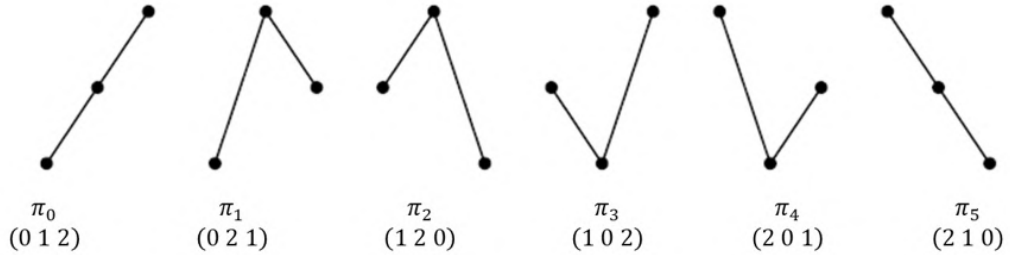


Figura 5 – Padrões ordinais para dimensão $d = 3$. Fonte: (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007).

A interpretação dos padrões de grande e pequena escala e Análise de Quantificação de Recorrência para OPRP é feita de mesma maneira como para RP. A representação simbólica possui como principal vantagem a robustez bem expressa contra a não estacionariedade (SCHINKEL; MARWAN; KURTHS, 2007). Bandt e Pompe (2002) desenvolveram uma medida de complexidade robusta baseada nesta dinâmica simbólica chamada de entropia de permutação (BANDT; POMPE, 2002).

2.2.3 Gráfico de Recorrência Cruzada

O Gráfico de Recorrência Cruzada (*Cross Recurrence Plot* - CRP) é uma extensão bivariada do RP, que serve para analisar a similaridade de dois sistemas dinâmicos no mesmo espaço de fase (MARWAN; KURTHS, 2002; MARWAN; THIEL; NOWACZYK, 2002; ZBILUT; GIULIANI; WEBBER-JR, 1998a). Considerem-se as trajetórias $\vec{x}_i$ ($i = 1, \dots, N$) e $\vec{y}_i$ ($i = 1, \dots, M$) de dois sistemas dinâmicos no mesmo espaço de fase. O CRP é a representação de uma matriz $N \times M$, definida por (MARWAN; THIEL; NOWACZYK, 2002):

$$\mathbf{CR}_{ij}(\varepsilon) = \Theta \left(\varepsilon - \left\| \vec{x}_i - \vec{y}_j \right\| \right), \quad (2.6)$$

que traz todas as características das estruturas dos RPs (descritas anteriormente), mas com trajetórias $\vec{x}_i$ e $\vec{y}_j$ que não possuem necessariamente o mesmo comprimento, levando, portanto, a uma matriz $\mathbf{CR}$ que pode não ser quadrada. Além disso, os valores da diagonal principal, $\mathbf{CR}_{ij}|_{i=1}^N$, não são necessariamente iguais à unidade. Assim, o CRP normalmente não apresenta uma linha diagonal principal preta (MARWAN et al., 2007).

As linhas que são orientadas na diagonal do gráfico representam os segmentos em ambas as trajetórias que correm paralelas por algum tempo. O comprimento e a frequência destas linhas estão relacionados a uma certa semelhança entre a dinâmica de ambos os sistemas. Em vez do LOI, CRP apresenta uma linha diagonal principal distorcida, chamada Linha de Sincronização (*Line Of Synchronization* – LOS) (MARWAN; KURTHS, 2005; MARWAN; KURTHS, 2002; MARWAN; THIEL; NOWACZYK, 2002).

2.2.4 Análise de Quantificação de Recorrência

A Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* – RQA) foi desenvolvida com base nas estruturas de pequena escala. A análise foi inicialmente proposta por Zbilut e Webber-Jr (1992), que definem parâmetros capazes de quantificar densidade de pontos e estruturas diagonais no Gráfico de Recorrência. Tais medidas são apropriadas para encontrar transições caos-ordem (TRULLA et al., 1996). As medidas da RQA foram posteriormente expandidas por Marwan et al. (2002) para quantificar as estruturas verticais (e horizontais) do RP. E essas são apropriadas para encontrar transições caos-caos (ou fases laminares) (MARWAN; THIEL; NOWACZYK, 2002).

As medidas que quantificam a densidade de pontos recorrentes e as estruturas diagonais do RP são: a taxa de recorrência, o determinismo, a entropia, o comprimento máximo da linha diagonal e, seu inverso, a divergência (MARWAN et al., 2007; RILEY;

ORDEN, 2005; ZBILUT; GIULIANI; WEBBER-JR, 1998b; ZBILUT; WEBBER-JR, 1992), a saber:

- **Taxa de recorrência:** (*Recurrence Rate* – *RR*): é a porcentagem de pontos recorrentes dentro de um limiar escolhido, obtido com a Equação 2.7. É a medida mais simples da RQA e pode variar de 0% (sem pontos recorrentes) a 100% (todos os pontos recorrentes).

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \mathbf{R}_{ij}(\varepsilon). \quad (2.7)$$

- **Determinismo** ou previsibilidade (*Determinism* – *DET*): é o percentual de pontos de recorrência que compõem as estruturas diagonais (com comprimento mínimo l_{min}). Sistemas periódicos fornecem linhas diagonais longas; sistemas caóticos, linhas diagonais curtas; e sistemas estocásticos não fornecem linhas diagonais. Esse percentual é calculado por

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{\sum_{l=1}^N lP(l)}, \quad (2.8)$$

onde $P(l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - \mathbf{R}_{i-1,j-1}) (1 - \mathbf{R}_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} \mathbf{R}_{i+k,j+k}$ é o histograma dos comprimentos l das linhas diagonais. É possível interpretar essa medida como a previsibilidade do sistema. O valor do determinismo para sistemas de alta previsibilidade, tais como sistemas periódicos, é igual a 1. O limiar l_{min} serve para remover as linhas diagonais que se formam pelo movimento tangencial na trajetória do espaço de fase. Quando o $l_{min} = 1$ o valor do determinismo é 1. Deve-se ter cuidado ao escolher l_{min} , porque, se l_{min} for muito grande, o histograma $P(l)$ pode se tornar esparsos e reduzir a confiabilidade do *DET*.

- **Comprimento médio da linha diagonal** (*average diagonal line length* – *L*): é o tempo médio que um segmento de trajetória leva para se aproximar de outro. Essa medida é obtida por

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}, \quad (2.9)$$

e pode ser interpretada como o tempo médio de previsão do sistema.

- **Comprimento máximo da linha diagonal** (*longest diagonal line* – L_{max}): é o comprimento máximo da linha diagonal no RP, excluindo a LOI, e é calculado pela Equação 2.10. A medida da divergência (*Divergence* – *DIV*) é o inverso do L_{max} , conforme 2.10, e está relacionada ao maior expoente de Lyapunov positivo (TRULLA et al., 1996).

$$L_{max} = \max(\{l_i\}_{i=1}^{N_l}) \implies DIV = \frac{1}{L_{max}}, \quad (2.10)$$

onde $N_l = \sum_{l \geq l_{min}} P(l)$ é o número total de linhas diagonais. Essa medida está ligada à divergência exponencial da trajetória do sistema. Isto significa que, quanto mais curtas são as linhas diagonais, mais caótico será o sistema, maior será a divergência e mais rapidamente as trajetórias divergem no espaço de fase.

- **Entropia** (*Entropy* – *ENTR*): é a entropia de informação de Shannon da probabilidade $p(l) = \frac{P(l)}{N_l}$ de encontrar a linha diagonal de comprimento l . Essa medida é calculada por

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N P(l) \ln P(l), \quad (2.11)$$

e indica a complexidade do RP em relação às linhas diagonais. Por exemplo, para um ruído não correlacionado, a medida *ENTR* será muito pequena, demonstrando a sua baixa complexidade.

As medidas que quantificam as estruturas verticais (e horizontais) do RP são: laminaridade e tempo de permanência (MARWAN et al., 2007; MARWAN et al., 2002):

- **Laminaridade** (*Laminarity* – *LAM*): é o percentual de pontos que formam as estruturas verticais (e horizontais) no RP e é obtido por

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=1}^N vP(v)}, \quad (2.12)$$

onde $P(v) = \sum_{i,j=1}^N (1 - \mathbf{R}_{i,j})(1 - \mathbf{R}_{i,j+v}) \prod_{k=0}^{v-1} \mathbf{R}_{i,j+k}$ é o histograma dos comprimentos v das linhas verticais (e horizontais). Para diminuir o impacto do movimento tangencial, o cálculo do *LAM* é realizado para valores v que excedam um comprimento mínimo v_{min} . O seu valor cai se o RP tiver apenas pontos isolados em vez de estruturas verticais (e horizontais).

- **Tempo de permanência** (*Trapping Time* – *TT*): é o comprimento médio das linhas verticais (e horizontais) e mede o tempo médio que o sistema permanecerá num determinado estado, ou por quanto tempo o estado permanecerá estável. Esse comprimento é calculado pela relação

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)}, \quad (2.13)$$

que, assim como no cálculo da *LAM*, também requer um comprimento mínimo v_{min} .

3 Metodologia

3.1 Descrição dos Dados

Os dados analisados são séries de vazão diária (originais e anomalias) (m^3/s) registradas em duas estações fluviométricas distribuídas ao longo do Rio São Francisco: Juazeiro (BA) e São Francisco (MG), e a série de precipitação diária (mm) registradas na estação Juazeiro. A estação Juazeiro está situada a 40 km a jusante da barragem Sobradinho, onde é influenciada pelo reservatório. Enquanto que, a estação São Francisco está localizada a montante da barragem Sobradinho, servindo com estação de controle. As séries temporais foram disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e correspondem ao período de janeiro de 1943 a dezembro de 2009. Todas as análises do estudo aqui desenvolvido foram realizadas com base na comparação entre os períodos anterior e posterior à construção da barragem de Sobradinho. As tabelas 1 e 2 apresentam informações das estações fluviométricas e da barragem e reservatório Sobradinho.

Tabela 1 – Caracterização das estações fluviométricas do Rio São Francisco.

Estações fluviométricas	Juazeiro/BA	São Francisco/MG
Código da estação	48020000	44200000
Latitude	-9.4064	-15.9494
Longitude	-40.5036	-44.8678
Altitude	358	448
Área de drenagem km^2	516000	184000
Localização da bacia	Sub-Médio	Médio
Operadora	CPRM	CPRM
Período	1943-2009	1943-2009

Fonte: (ANA, 2024)

Tabela 2 – Descrição da barragem e reservatório Sobradinho.

Antes da construção	1943-1972
Duração da construção	1973-1979
Depois da construção	1980-2009
Longitude	40° 50' Oeste
Latitude	9° 35' Sul
Potência instalada MW	1050,3
Área do reservatório km ²	4214
Volume total hm ³	34116
Volume útil hm ³	28669
Vazão regularizada m ³ /s	2060
Fonte: (CHESF, 2024)	

3.2 Metodologia

O procedimento utilizado neste trabalho para a análise dos dados é realizado com séries de vazão e da precipitação da bacia do Rio São Francisco. Analisaram-se séries originais, séries de anomalias e séries normalizadas de acordo com seguintes passos:

1. A partir das séries temporais originais de vazão (escala temporal 1 dia) calculam-se séries em escalas temporais de 1 semana e 1 mês com médias semanais e mensais dos dados originais, respectivamente. Em seguida foram calculadas as séries de anomalias 3.1 e as séries normalizadas 3.2.

As séries de anomalias, que reduzem a influência da sazonalidade das séries temporais diárias, foram calculadas através da equação:

$$X(t) = \frac{x(t) - \mu_t}{\sigma_t}, \quad (3.1)$$

onde μ_t é a média de vazão diária, $x(t)$ é calculado para cada dia do calendário (01 de janeiro até 31 de dezembro) usando todos os anos do registro e σ_t é o desvio padrão de $x(t)$, também calculado para cada dia calendário (KANTELHARDT et al., 2006).

As séries normalizadas (entre 0 e 1) são calculadas de acordo com a equação:

$$Y = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \quad (3.2)$$

onde x é denota a série original, $\max(x)$ e $\min(x)$ são os valores de máximo e mínimo de x , respectivamente (BASTOS; CAIADO, 2011).

2. Estimam-se os parâmetros de imersão m e de retardo τ para a reconstrução do espaço de fase. A dimensão de imersão m é estimada pelo Método dos Falsos Vizinhos mais Próximos (FNN) (KENNEL; BROWN; ABARBANEL, 1992) e o retardo τ pelo Método de Informação Mútua (FRASER; SWINNEY, 1986). O limiar ε determina-se com uso do método iterativo sugerido por Webber-Jr e Zbilut (2005), que consiste na busca pelo limiar que produz um percentual entre 1% e 5% do valor da taxa de recorrência, $RR(\varepsilon)$, dada pela relação Equação 2.7.
3. As séries mensais originais e anomalias da vazão, registrados nas estações São Francisco e Juazeiro, foram analisadas com métodos Gráfico de Recorrência (RP), Gráfico de Recorrência do Padrão Ordinal (OPRP) e Análise de Quantificação de Recorrência (RQA). Os parâmetros do RP e do OPRP foram obtidos como descrito no passo anterior. Os gráficos RP e OPRP foram elaborados e índices de RQA foram calculados para períodos anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) a construção de Sobradinho, assim, permitido a comparação do desempenho de dois métodos em avaliar as alterações hidrológicas causadas pela atividade humana.
4. As séries normalizadas de vazão, nas escalas temporais diária, semanal e mensal, registrada na estação de Juazeiro foram analisadas com método Gráfico de Recorrência (RP) e Análise de Quantificação de Recorrência (RQA). Os parâmetros para o RP foram obtidos como descrito no passo anterior. Os gráficos RP foram elaborados e os índices de RQA foram calculados para períodos antes (1943-1972) e depois (1980-2009) da construção de Sobradinho, permitindo a comparação de comportamento da dinâmica de vazão nas diferentes escalas temporais e influência da atividade humana (construção da barragem e reservatório Sobradinho).
5. As séries mensais normalizadas de vazão e de precipitação registrada na estação de Juazeiro, foram analisadas com métodos Gráfico de Recorrência (RP), Gráfico de Recorrência Cruzada (CRP), Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) e Análise de Quantificação de Recorrência Cruzada (CRQA). Os parâmetros para o RP e CRP foram obtidos como descrito no passo anterior. Os gráficos RP e CRP foram elaborados e os índices de RQA e CRQA foram calculados para períodos antes (1943-1972) e depois (1980-2009) da construção de Sobradinho, permitindo avaliar a influência da construção da barragem na correlação entre as variáveis hidrológicas: vazão e precipitação.

3.2.1 O *Software* utilizado

O procedimento e análise dos dados foram realizados com o auxílio do *software* R Core Team (2023). O principal pacote utilizado foi *crqa* (COCO et al., 2020), através da função *OptimizeParam* calculou-se os valores adequados dos parâmetros necessários (τ , m e ε) para construção do RP e CRP. Para elaboração do Gráfico de Recorrência, do Gráfico de Recorrência Cruzada e a Análise de Quantificação de Recorrência utilizou-se a função *crqa* usando os parâmetros obtidos a partir da função de otimização.

4 Resultados

As séries diárias de vazão e as séries de anomalias (calculadas de acordo com a Equação 3.1), que foram utilizadas para obter os resultados de RP e OPRP, são apresentadas nas figuras 6 e 7, respectivamente.

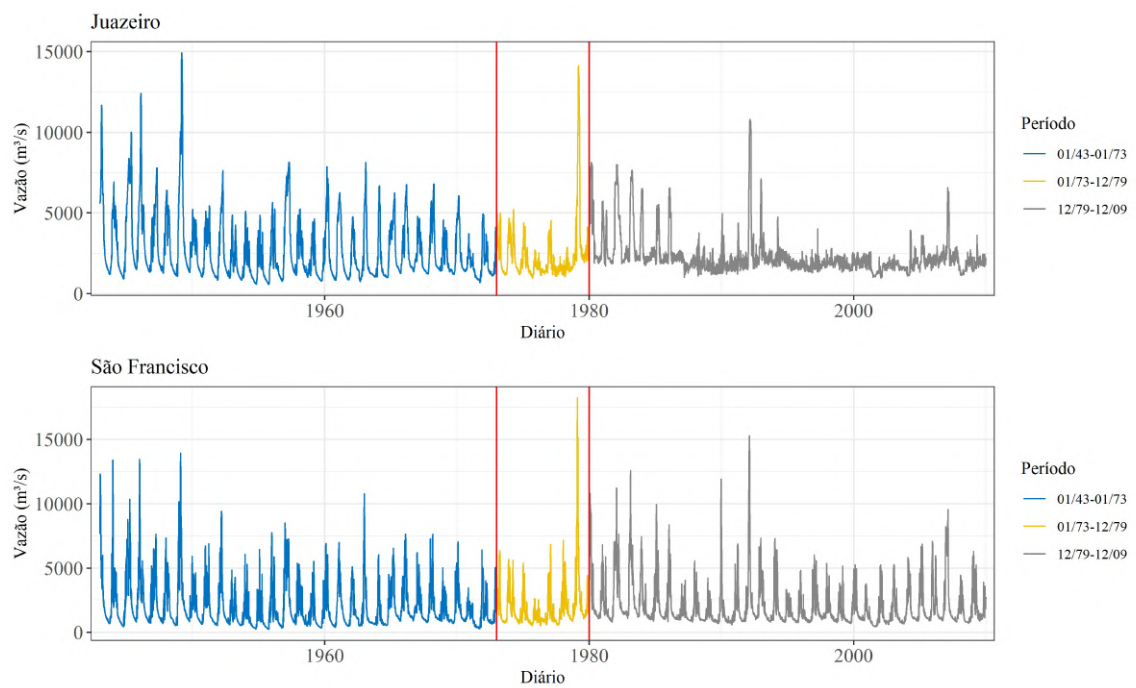


Figura 6 – Séries originais diárias de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

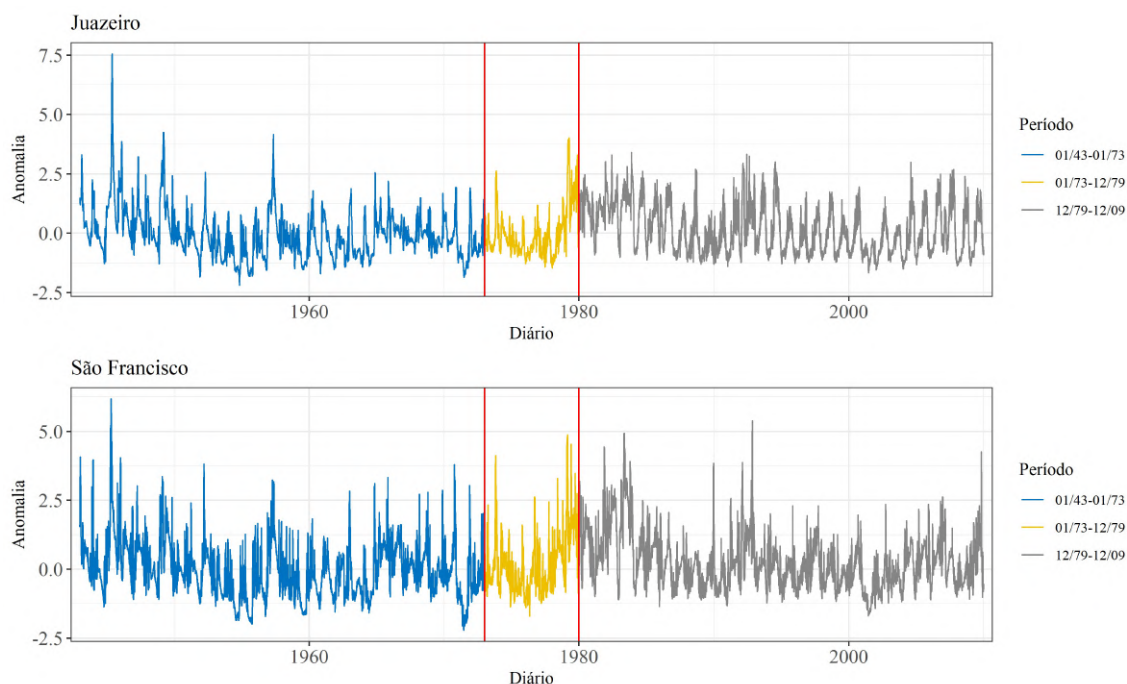


Figura 7 – Séries originais diárias de anomalia de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

Observa-se o comportamento sazonal anual da vazão, o que está possivelmente ligado às ocorrências dos períodos chuvosos na localidade. Por outro lado, na estação de Juazeiro mostra mudanças no padrão do comportamento de vazão. Antes do funcionamento da barragem Sobradinho, a vazão se mostrava com menor variabilidade, já depois houve um aumento nas vazões mínimas (para mais de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$) causado pelo efeito regulador da barragem. No período de 1987 a 1994, quando a barragem de Xingó foi construída, a barragem de Sobradinho garantiu a vazão para os complexos hidrelétricos localizados a jusante. A partir deste período, há uma atividade reguladora mais agressiva e as vazões mínimas obrigatórias são reduzidos para cerca de $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ (MANETA et al., 2009).

Como esperado, as séries de anomalia da vazão apresentam uma redução no comportamento sazonal e os distintos padrões comportamentais exibidos nas séries originais não se encontram tão bem definidos.

4.1 Comparação entre o Gráfico de Recorrência e o Gráfico de Recorrência dos Padrões Ordinais

Nesta seção são apresentados os resultados de análise do Gráfico de Recorrência e do Gráfico de Recorrência dos Padrões Ordinais das séries mensais de vazão e anomalia. São apresentadas nas figuras 8 e 9 as séries temporais da vazão e da anomalia, respectivamente.

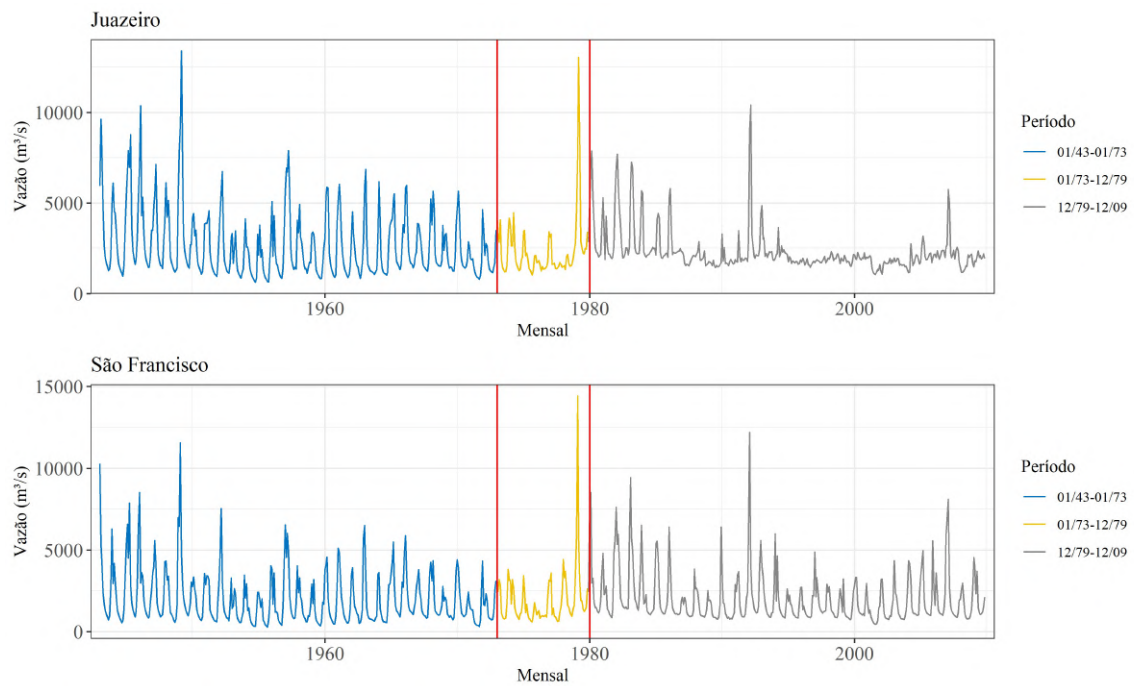


Figura 8 – Séries mensais de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

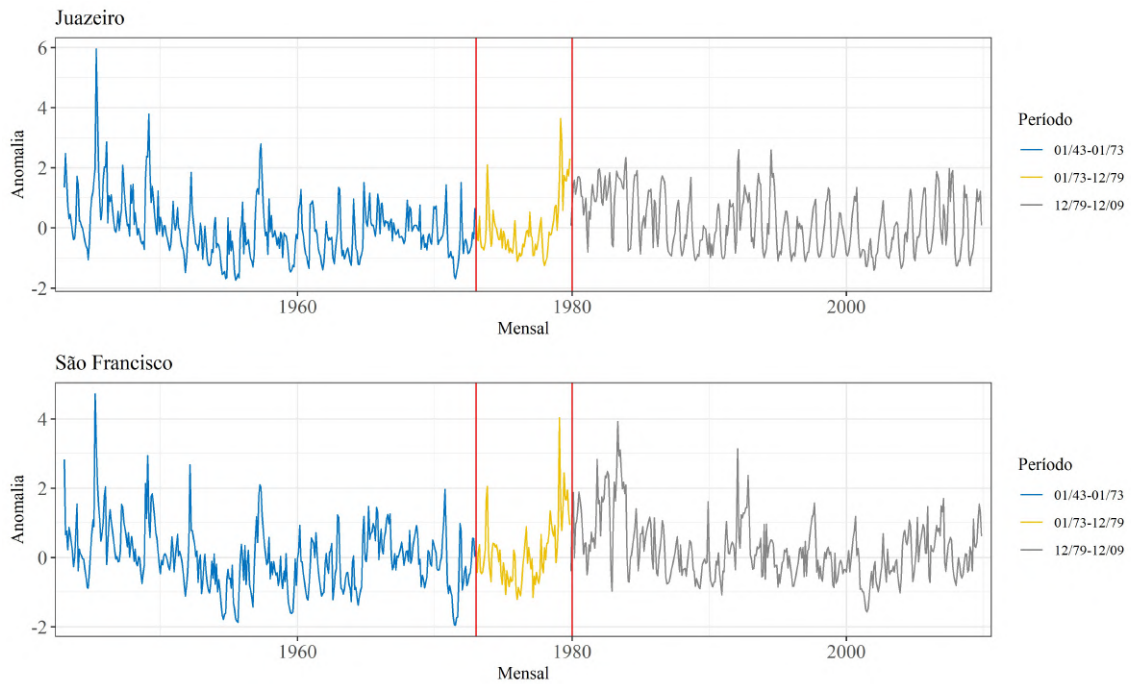


Figura 9 – Séries mensais de anomalia de vazão do Rio São Francisco. As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

Com base nas séries temporais de dados de vazão e anomalia, constroem-se os RP e OPRP (ambas calculadas a partir de média mensal de dados diários) das duas estações fluviométricas: a estação Juazeiro, que sofre impacto da barragem, está localizada cerca de 40 km a jusante da barragem de Sobradinho e a estação de São Francisco sem impacto, localizada a cerca de 350 km a montante da barragem de Sobradinho. Os RP e OPRP são construídos para os períodos anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) da construção à barragem de Sobradinho.

4.1.1 Gráfico de Recorrência (RP)

A dimensão de imersão m é estimada pelo Método dos Falsos Vizinhos mais Próximos (FNN) (KENNEL; BROWN; ABARBANEL, 1992), o retardo τ pelo Método de Informação Mútua (FRASER; SWINNEY, 1986) e o limiar ε determinado com uso do método iterativo sugerido por Webber-Jr e Zbilut (2005), que consiste na busca pelo limiar que produz um percentual entre 1% e 5% do valor da taxa de recorrência, $RR(\varepsilon)$, dada pela equação (2.7). A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros essenciais para a reconstrução do espaço de fase.

Tabela 3 – Parâmetros do RP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries mensais de vazão e de anomalia da vazão do Rio São Francisco nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

	Vazão		Anomalia	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
Juazeiro				
m	2	6	5	3
τ	8	7	5	8
ε	509,52	794,54	1,19	0,69
São Francisco				
m	2	8	4	3
τ	8	8	9	9
ε	421,11	1925,02	1,20	0,55

Os Gráficos de Recorrência das séries mensais da vazão do Rio São Francisco para as estações de Juazeiro e São Francisco são mostrados nas Figuras 10 e 11 respectivamente.

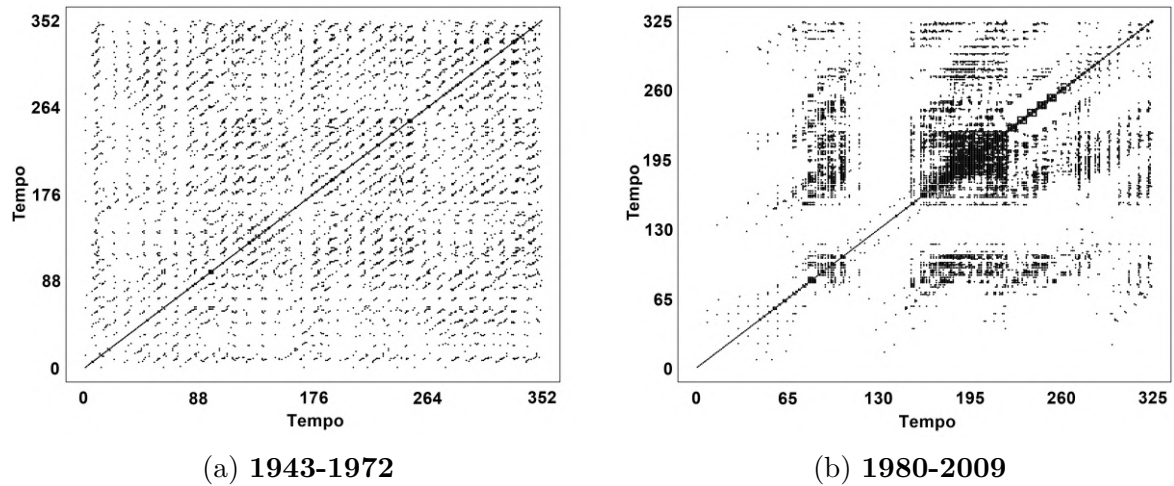


Figura 10 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

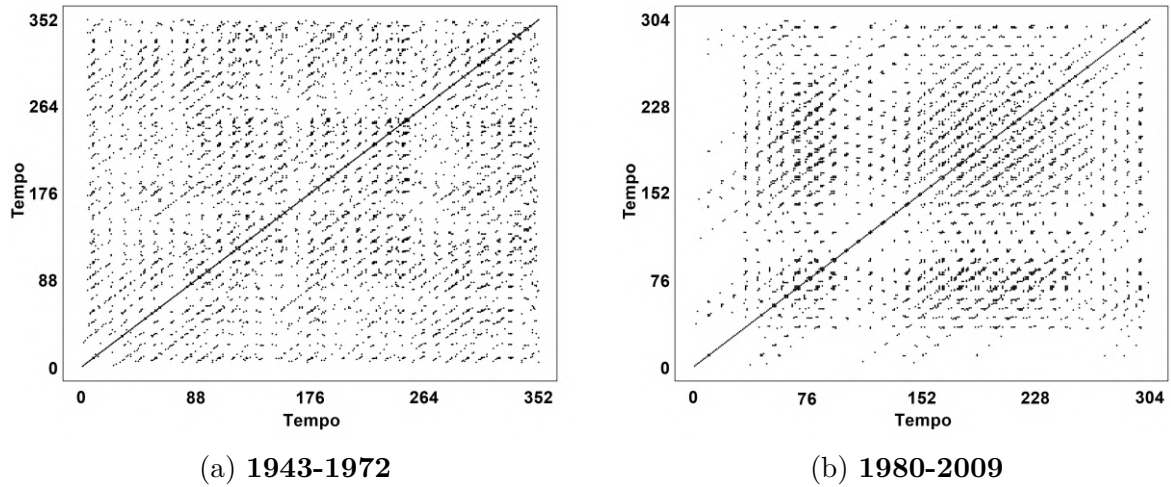


Figura 11 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

Os Gráficos de Recorrência das séries mensais da anomalia da vazão do Rio São Francisco para as estações de Juazeiro e São Francisco são mostrados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

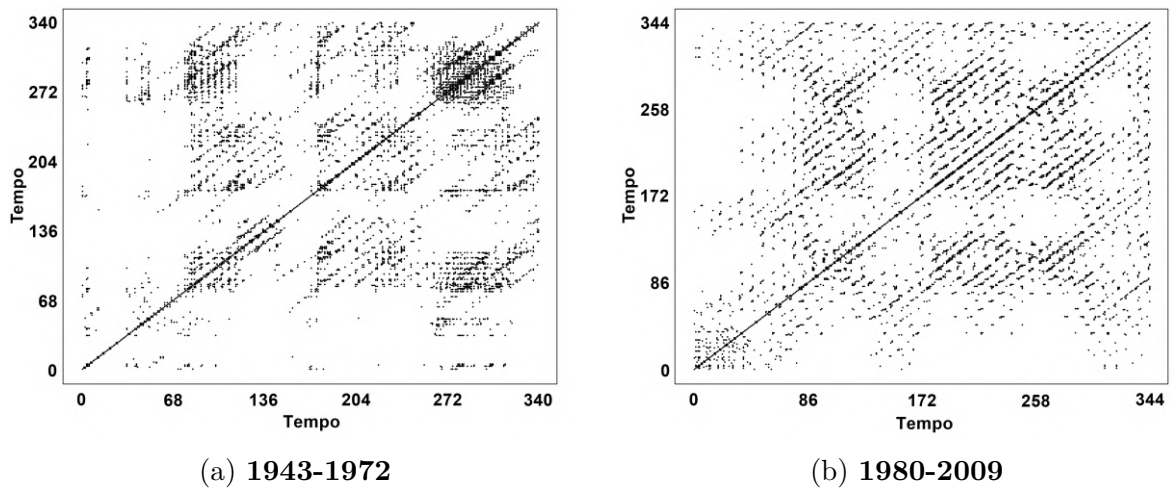


Figura 12 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

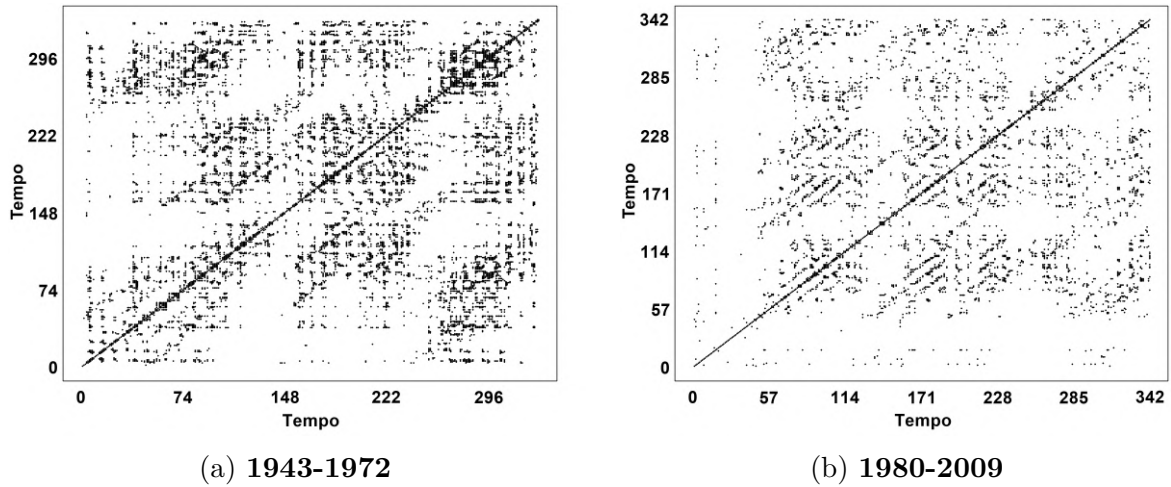


Figura 13 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

Observa-se que o RP da estação Juazeiro (Figura 10) antes da construção de Sobradinho contém blocos com linhas diagonais indicando comportamento periódico (devido a sazonalidade anual). Depois da construção, o padrão de RP mudou e apresentou faixas brancas, indicando as mudanças repentinas e eventos extremos (MARWAN et al., 2007), como pode ser visto na Figura 8. Para a estação de São Francisco (Figura 11) o RP de regime natural (antes da construção de Sobradinho) é semelhante ao RP de Juazeiro, e não se observou mudança significativa depois da construção de Sobradinho. Este comportamento foi esperado porque a estação São Francisco encontra-se a 350km a montante de Sobradinho e não foi impactada pela operação da barragem.

Os RPs de anomalias (Figuras 12 e 13) são similares as duas estações, que também foi esperado devido à sazonalidade removida.

Os valores dos parâmetros da Análise de Quantificação de Recorrência para as séries de vazão e de anomalia da vazão para os períodos anterior e posterior à construção da barragem são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros para a análise de Quantificação de Recorrência (RQA) das séries mensais de vazão e de anomalia de vazão do Rio São Francisco no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) à construção da barragem de Sobradinho.

	Vazão		Anomalia	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
Juazeiro				
REC	0,024	0,038*	0,024	0,023
DET	0,412	0,587	0,378	0,511
L	2,512	3,269	2,422	2,706
L_{max}	6	83	20	20
ENTR	0,960	1,295	0,789	1,101
LAM	0,393	0,716	0,537	0,562
TT	2,237	3,903	2,471	2,331
São Francisco				
REC	0,022	0,024	0,045	0,020
DET	0,381	0,427	0,502	0,299
L	2,395	2,372	2,436	2,309
L_{max}	6	6	8	7
ENTR	0,829	0,799	0,871	0,709
LAM	0,370	0,551	0,670	0,474
TT	2,149	2,493	2,750	2,340

*Valores mais altos estão destacados em negritos. REC – taxa de recorrência; DET – determinismo; L – comprimento médio da diagonal; L_{max} – comprimento máximo da diagonal; ENTR – entropia; LAM – laminaridade; TT – tempo de permanência.

A RQA oferece uma informação mais detalhada do processo subjacente do que pode ser extraído só pela análise visual do RP. Nota-se que, após a construção da barragem, todos os valores das medidas RQA da vazão para a estação Juazeiro aumentaram, indicando que a construção da barragem alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime mais regular (maior REC), mais previsível (maior DET, L e L_{max}), mais complexo (maior ENTR), e mais estável (maior LAM e TT). Para a estação São Francisco os valores dessas medidas são próximos entre si. A RQA das anomalias depois da construção mostrou, para Juazeiro um aumento na maioria dos índices, enquanto para São Francisco todos os índices diminuíram, indicando uma possível mudança climática no mesmo período.

4.1.2 Gráfico de Recorrência de Padrões Ordinais (OPRP)

Em todos os casos utilizou-se $m = 4$ e $\tau = 1$ para definir os padrões ordinais usando o esquema de simbolização de Bandt e Pompe (2002) e construiu o OPRP usando o critério mostrado na Equação 2.5. Os OPRPs de vazão mensal e anomalia da vazão mensal das estações de Juazeiro e São Francisco para períodos antes e depois da construção da barragem de Sobradinho são mostrados nas figuras 14, 15, 16 e 17, respectivamente.

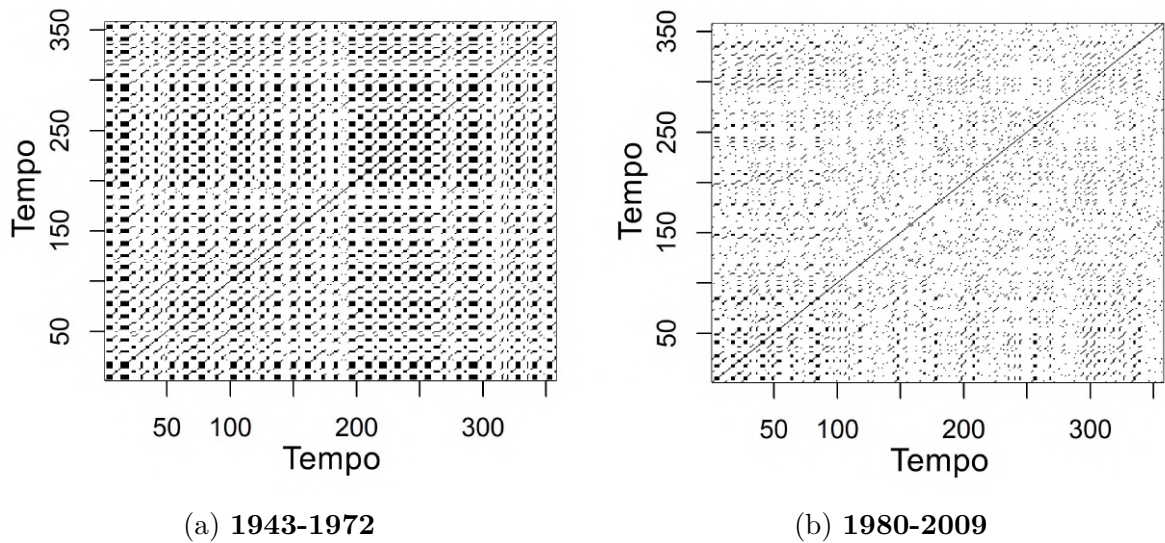


Figura 14 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

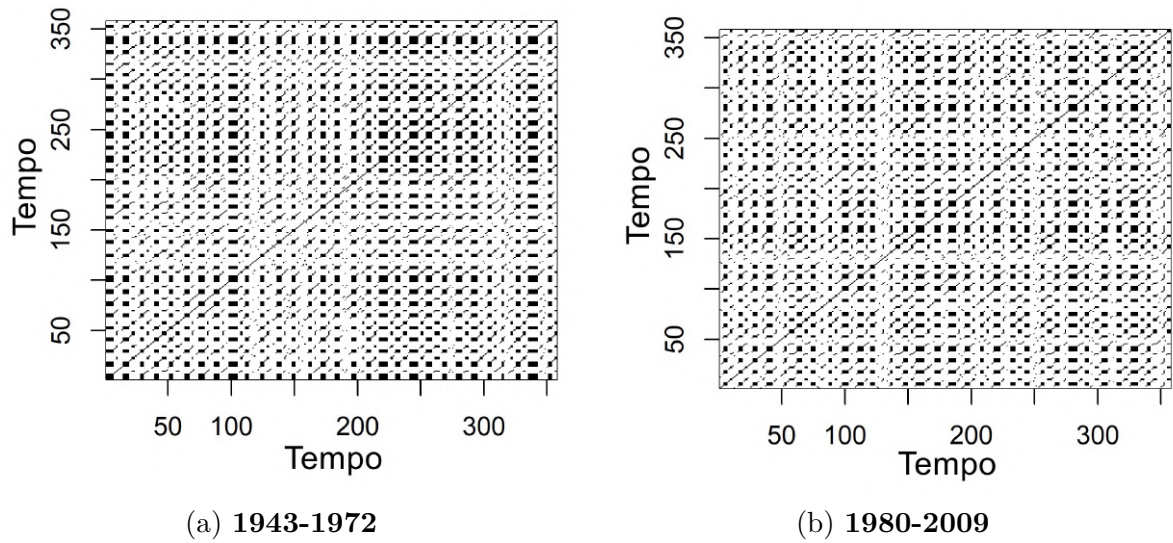


Figura 15 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

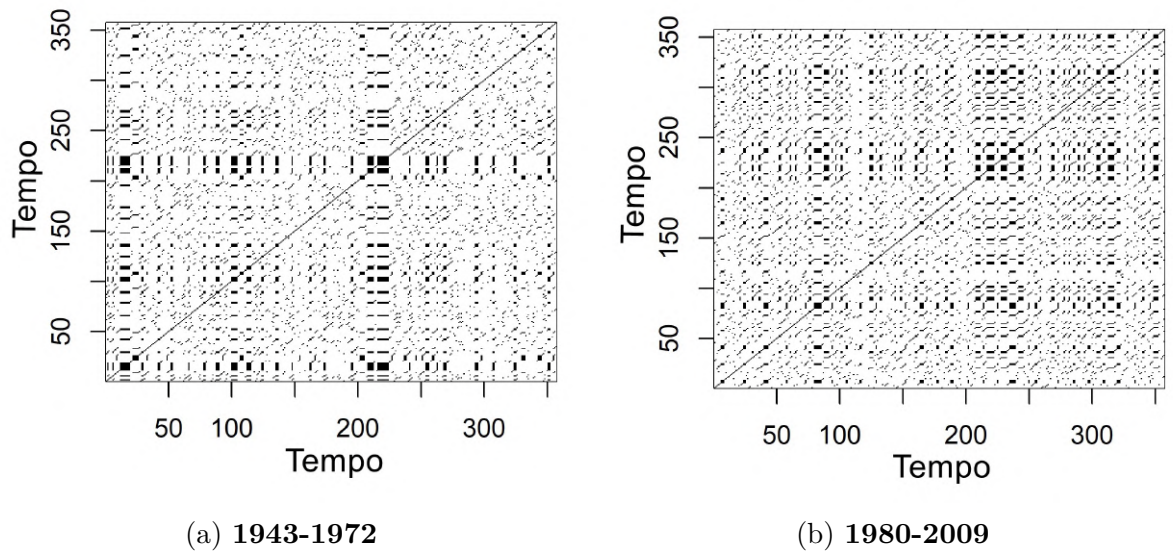


Figura 16 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordinais (OPRPs) das séries mensais de anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

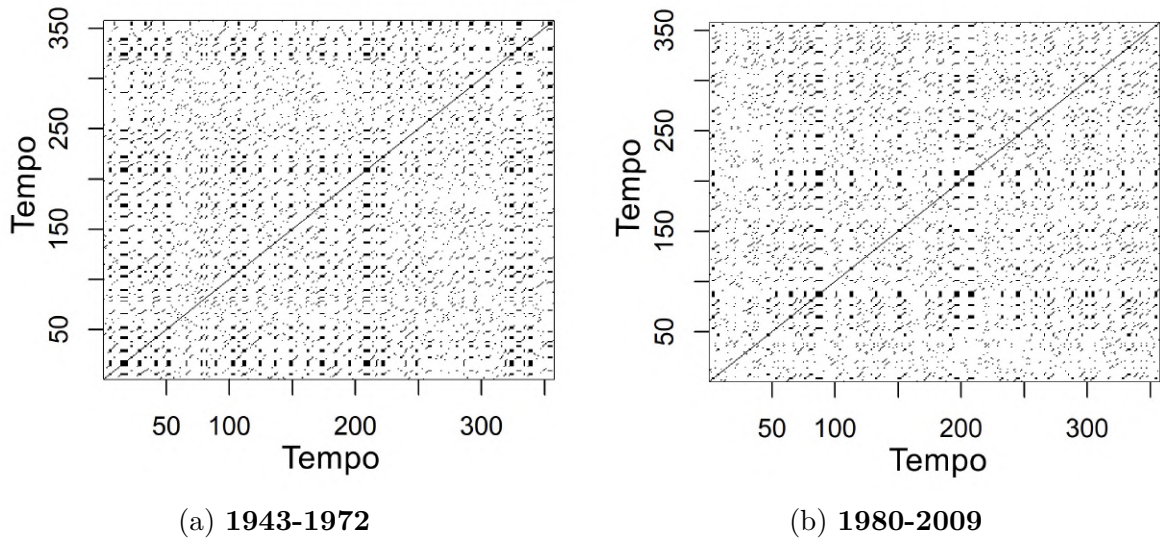


Figura 17 – Gráficos de Recorrência dos Padrões Ordiniais (OPRPs) das séries mensais de anomalia da vazão do Rio São Francisco da estação de São Francisco no período (a) antes (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

Pode-se observar nas figuras 14 e 15 que os OPRPs para as séries de vazão têm padrão semelhante para o período de regime natural (antes da construção da barragem de Sobradinho) para ambas as estações e para o período pós-construção para estação São Francisco. Este resultado qualitativo é esperado, pois a estação São Francisco não é afetada pela operação da barragem. A estação de Juazeiro, que é fortemente impactada pela operação da barragem, mostra um padrão OPRP diferente no período pós-construção. Torna-se mais homogêneo com pontos mais isolados, indicando a mudança para um regime mais irregular na dinâmica de vazão.

No entanto, para as séries de anomalias (figuras 16 e 17), mesmo para a estação Juazeiro, OPRP é semelhante antes e depois da construção da barragem. A barragem e reservatório de Sobradinho, além de ser usada para geração de energia, também regula o regime de cheias, que pode ser observado como redução da vazão após 1980. Embora a vazão seja significativamente reduzida, ela preserva características sazonais (devido à forte sazonalidade das chuvas) e a dinâmica temporal das séries de anomalias não se afasta muito do período pré-construção. Essas observações são confirmadas pelos resultados do RQA mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise de Quantificação de Recorrência (OPRQA) das séries mensais de vazão e de anomalias de vazão do Rio São Francisco no período antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

	Vazão		Anomalia	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
Juazeiro				
REC	0,1754*	0,0599	0,0807	0,0937
DET	0,8272	0,5380	0,6547	0,6298
L	3,1930	2,7099	2,7351	2,7593
L_{max}	16	10	11	10
ENTR	1,4550	0,9212	1,0487	1,0874
LAM	0,8511	0,2942	0,5601	0,5711
TT	4,0301	2,5487	3,2258	2,9838
São Francisco				
REC	0,1733	0,1615	0,0749	0,0644
DET	0,8460	0,8261	0,6073	0,6036
L	3,1974	3,0931	2,6638	2,7278
L_{max}	17	15	8	11
ENTR	1,4565	1,3834	0,9573	0,9846
LAM	0,8758	0,8635	0,5351	0,4305
TT	4,0185	3,8143	2,8305	2,6156

*Valores mais altos estão destacados em negritos. REC – taxa de recorrência; DET – determinismo; L – comprimento médio da diagonal; L_{max} – comprimento máximo da diagonal; ENTR – entropia; LAM – laminaridade; TT – tempo de permanência.

Há uma diminuição nos valores de todos os índices RQA para a estação Juazeiro para o período pós-construção, indicando uma dinâmica menos regular (menor REC), menos previsível (menor DET, L e L_{max}), menos complexa (menor ENTR) e menos estável (menor LAM e TT). Para a estação São Francisco, os valores dos índices RQA são preservados após a construção da barragem. Durante o regime natural antes da construção da barragem de Sobradinho (1943-1972), os valores de RQA são muito semelhantes para as estações de Juazeiro e São Francisco. Esse resultado também é esperado, pois as recorrências no OPRP incluem apenas ordenação local de valores de séries temporais. Ambas as estações estão localizadas na região semiárida da bacia do SF, caracterizada por um regime de chuva semelhante, resultando em dinâmicas de flutuação de vazões semelhantes, embora devido à maior área de drenagem, os valores de vazão sejam maiores na estação de Juazeiro. Para as séries de anomalias, todos os índices RQA são semelhantes para ambas as estações e

para ambos os períodos.

A mudança no regime dinâmico de vazão, menos previsível (menor regular), após a construção da barragem também são encontrados nos estudos de Stosic et al. (2016) com base na entropia de permutação, análise de complexidade estatística em Barreto et al. (2020), onde utilizou o método *Sample Entropy* e em Barreto, Santos e Stosic (2020) com análise de Fisher-Shannon. Outros estudos em outras bacias, utilizando entropia de amostra e método de entropia multiescala, mostram também que a construção de uma barragem leva mudanças significativas na dinâmica de vazão, em relação a diminuição da regularidade e perda de complexidade (LI; ZHANG, 2008; HUANG et al., 2011; ZHANG et al., 2012).

Comparando os resultados RQA para RP (Tabela 4) e OPRP (Tabela 5) pode se concluir que OPRP é mais sensível em detecção das alterações hidrológica causadas pela atividade humana (construção das barragens e reservatórios). As recorrências em RP são baseadas em “distância” entre os estados do sistema dinâmico, que contém informação sobre os valores das séries, enquanto, as recorrências em OPRP são “exatas”, repetições de padrões ordinais que só contém a informação sobre a ordenação local (*ranking*) dos valores da série temporal.

No estudo realizado por Schinkel, Marwan e Kurths (2007), eles mostram a diferença entre o RP e o OPRP. Utilizaram uma série temporal curta (150 pontos), o que seria um problema para outros meios de análise, derivada do mapa logístico ($x_{(n+1)} = ax_n(1 - x_n)$). Eles observaram que tanto para o RP quanto para o OPRP a transição do periódico para o caos é observada claramente. Mas quando adicionaram ruído uniformemente ao sinal e calculam novamente, o OPRP foi praticamente o mesmo observado anteriormente, já o RP não detectou o comportamento periódico nem a transição do periódico para o caos, assim, dificultando inferir qualquer informação uma vez que o ruído distorce fortemente o sinal.

Os valores das medidas do RQA acima revelam uma visão geral do comportamento da vazão e da anomalia durante o período estudo. No entanto, é importante entender a evolução dessas variáveis em função do tempo, em particular, seu comportamento durante eventos extremos ocorridos na localidade, por exemplo, a construção de barragem. Para estudar a evolução temporal das medidas do RQA e detectar a dinâmica transitória da vazão e da anomalia é calculado janela móvel a partir das medidas do RQA do OPRP (TRULLA et al., 1996).

Essas janelas representam OPRPs menores que deslizam ao longo da linha diagonal principal do OPRP, produzidos a partir os dados completos da vazão e da anomalia da vazão diária. A extensão da janela móvel simboliza um compromisso entre a resolução de flutuações locais de pequena escala e a detecção de estruturas de recorrência localizadas

mais distantes da LOI (BASTOS; CAIADO, 2011). A fim de observar possíveis alterações no regime de vazão e anomalia da vazão durante o período analisado, constrói-se o OPRP em janelas móveis de tamanho 3 anos com passo de 1 mês ao longo de toda a série temporal. A evolução temporal dos quantificadores RQA é mostrada na Figura 18.

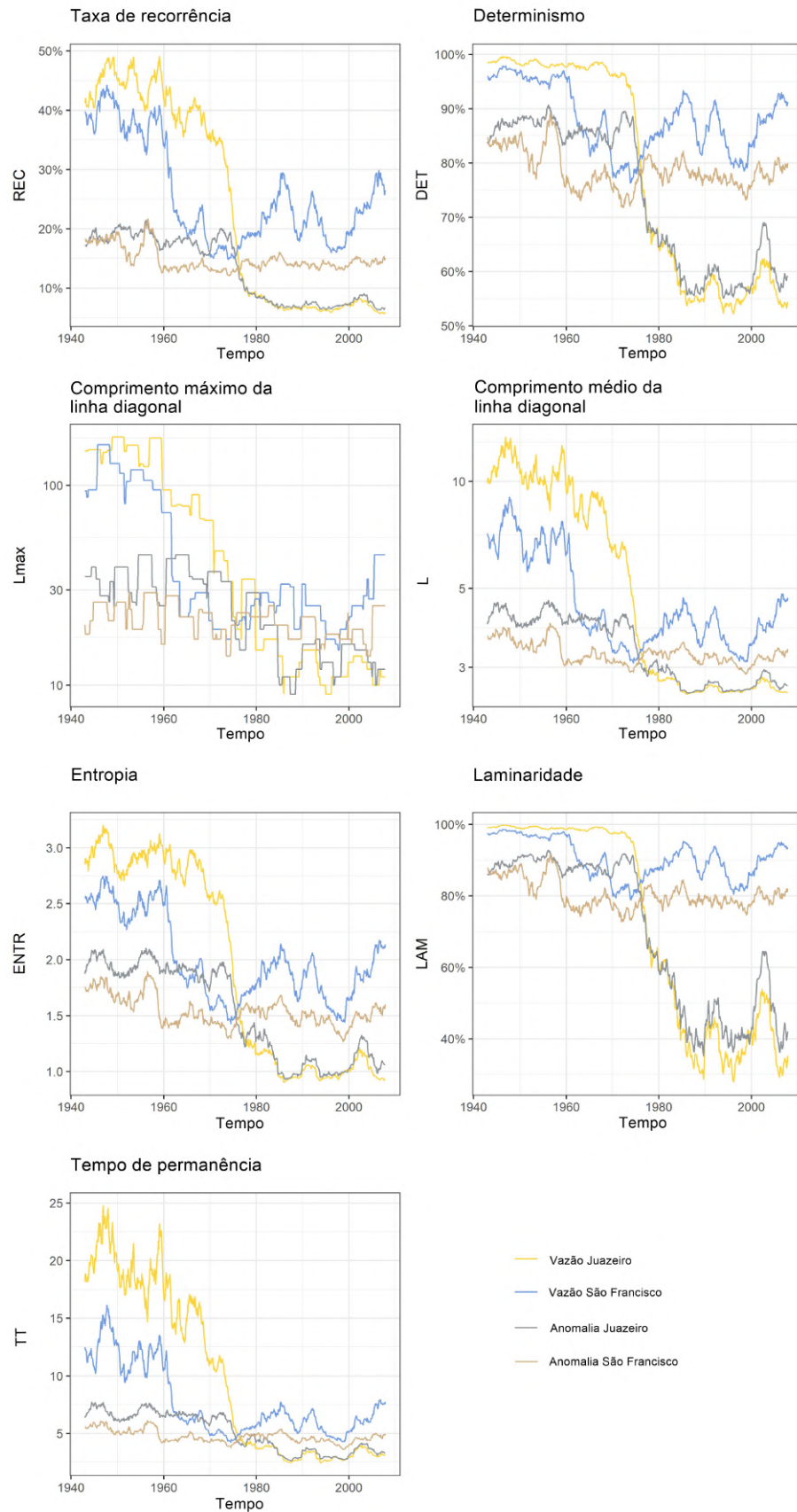


Figura 18 – Evolução temporal das medidas de RQA para séries de vazão diária (originais e anomalias) para as estações de Juazeiro e São Francisco calculadas em janelas móveis de 3 anos de duração com o deslocamento de 1 mês.

Para a estação Juazeiro para a série original (linha amarela) observa-se a diminuição dos valores de RQA após a construção da barragem de Sobradinho (1980). Para a estação São Francisco (linha azul) os valores de RQA diminuíram na década de 60 após a construção da barragem de Três Marias localizada a montante (1962) (CEMIG, 2024). Isso é confirmado pela evolução das medidas RQA para séries de anomalias. Embora praticamente não haja diferença entre estações e períodos dos quantificadores RQA para séries de anomalias (tabela 2), a técnica de janelas móveis resulta em comportamento semelhante (embora menos pronunciado) às séries originais: a diminuição dos quantificadores RQA nos anos 80 para a estação Juazeiro e na década de 60 para a estação São Francisco. Para a porcentagem de pontos de recorrência que formam linhas diagonais (DET) e linhas verticais (LAM), as anomalias (estação de Juazeiro) apresentaram evolução ainda quantitativamente semelhante à série original, indicando que a construção da barragem induz alterações hidrológicas em regimes menos previsíveis e menos estáveis.

Com base nos resultados para janelas móveis mostradas na Figura 18, calculou-se a estimativa da função de densidade de probabilidade (fdp) via *Kernel Density Estimation* para os índices RQA para os períodos pré e pós-construção: para a estação São Francisco antes e depois da construção da barragem de Três Marias e para a estação Juazeiro antes e depois da construção da barragem de Sobradinho, onde foram excluídas as janelas que contêm dados durante a construção das barragens (1957-1961 para São Francisco e 1973-1979 para Juazeiro). As fdps dos índices RQA para as estações Juazeiro e São Francisco são mostradas nas figuras 19 e 20, respectivamente.

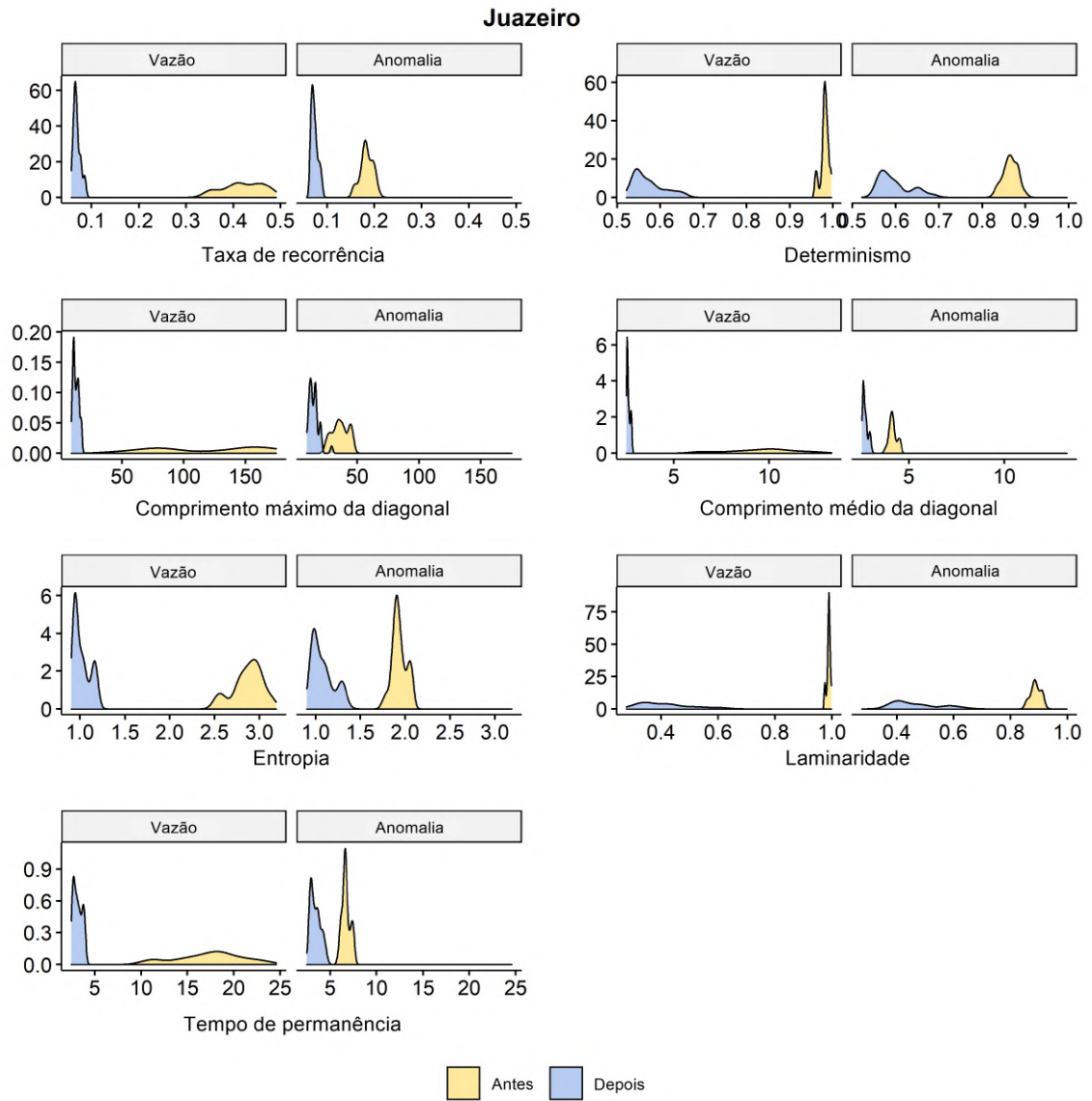


Figura 19 – Funções de densidade de probabilidade dos índices RQA para séries originais e de anomalias para a estação Juazeiro, calculadas em janelas móveis mostradas na Figura 18. Diferentes cores correspondem aos períodos pré e pós-construção da barragem de Sobradinho.

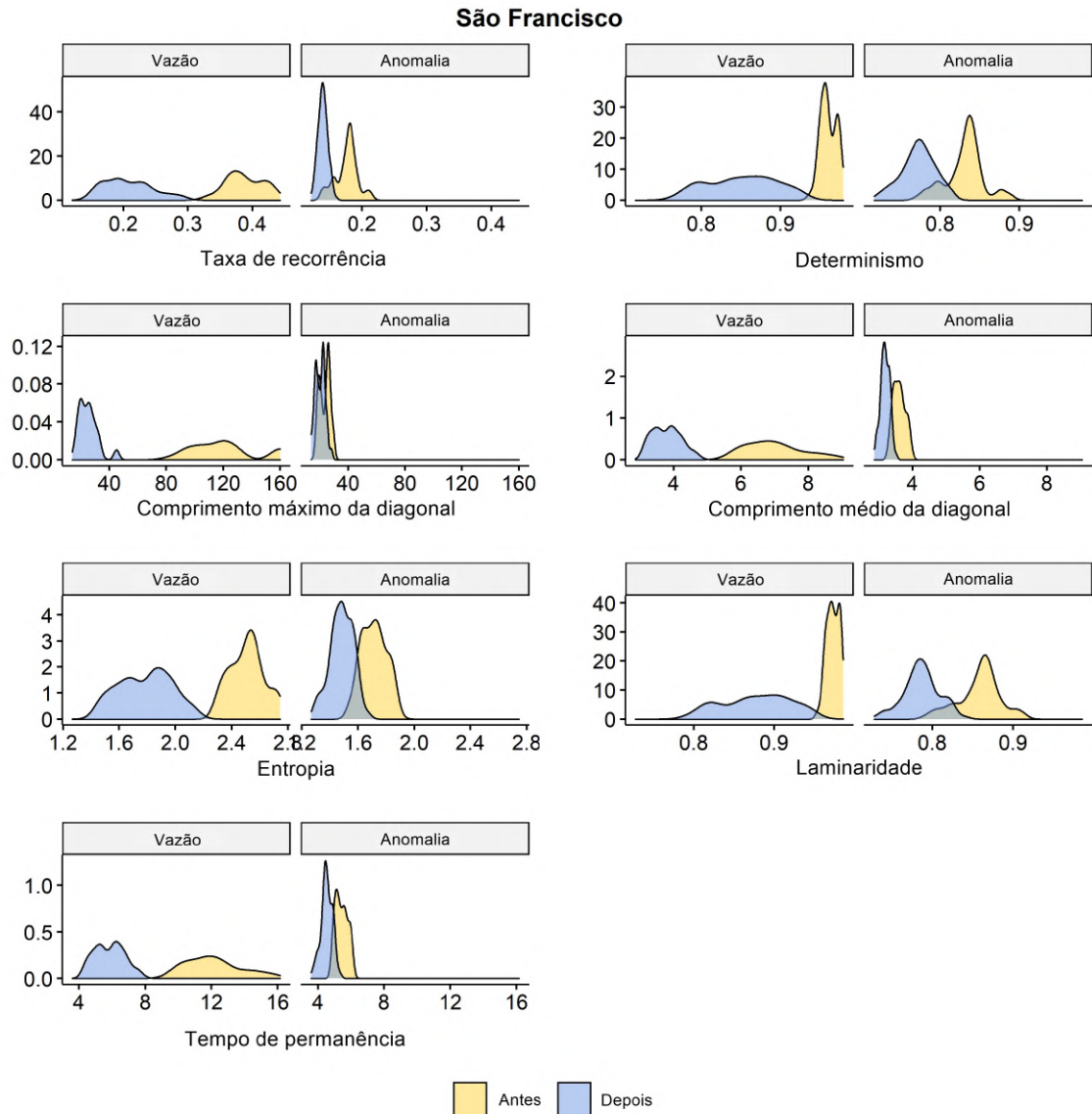


Figura 20 – Funções de densidade de probabilidade dos índices RQA para séries originais e de anomalias para a estação São Francisco, calculadas em janelas móveis mostradas na Figura 18. Diferentes cores correspondem aos períodos pré e pós-construção da barragem de Sobradinho.

Para a estação Juazeiro (Figura 19) essas distribuições diferem entre si para o período pré-construção e pós-construção, sendo mais diferentes para a série original do que para a série de anomalias. Para porcentagem de pontos de recorrência que formam linhas diagonais (DET) e linhas verticais (LAM) as distribuições para anomalias também são bem separadas confirmando a evolução desses índices mostrados na Figura 18.

Para a estação São Francisco (Figura 20) as distribuições se sobrepõem para todas as séries dos índices de anomalias. A estação São Francisco está localizada a jusante da barragem de Três Marias e após a construção da barragem (1962) mostra a evolução

semelhante dos índices RQA para as séries originais como a estação Juazeiro após a construção da barragem de Sobradinho (1980): i) valores mais baixos e distribuição mais larga para porcentagem de pontos de recorrência nas linhas diagonais (DET) e porcentagem de pontos de recorrência nas linhas verticais (LAM); ii) valores mais baixos e distribuição mais achatada para comprimento médio das linhas diagonais (L), comprimento da linha diagonal mais longa (L_{max}) e comprimento médio das linhas verticais (TT). Essas mudanças são menos pronunciadas para a estação São Francisco, que fica mais longe da represa Três Marias (350 km) do que a estação Juazeiro da represa Sobradinho (40 km). No entanto, ambas as estações mostraram a mudança no regime de vazão na mesma direção: uma dinâmica menos previsível (menor DET) com menor tempo de previsão (menor L) e menos estável (menor LAM) com menor tempo de permanência (menor TT).

4.2 Gráfico de Recorrência da vazão nas diferentes escalas temporais.

Sivakumar (2001) destacou que a mudança das características da chuva de uma escala para outra é útil em termos de relacionar o processo de chuva entre diferentes escalas temporais, o que pode fornecer informações sobre o comportamento do processo de mudança da chuva. São úteis também em relação às atividades de manejo da terra e da água, tanto a curto como a longo prazo (SIVAKUMAR et al., 2006). Afim de extrair informações sobre o comportamento do processo de mudança na vazão nesta seção são apresentados os resultados de análise do Gráfico de Recorrência das séries normalizadas (obtidas usando Equação 3.2) de vazão da estação fluviométrica Juazeiro (BA), para diferentes escalas temporais: diária, semanal (média semanal de dados diários) que descrevem a variabilidade intra-anual da vazão e mensal (média mensal de dados diários) que descreve a variabilidade interanual de vazão. As séries analisadas são apresentadas nas figuras 21, 22 e 23.

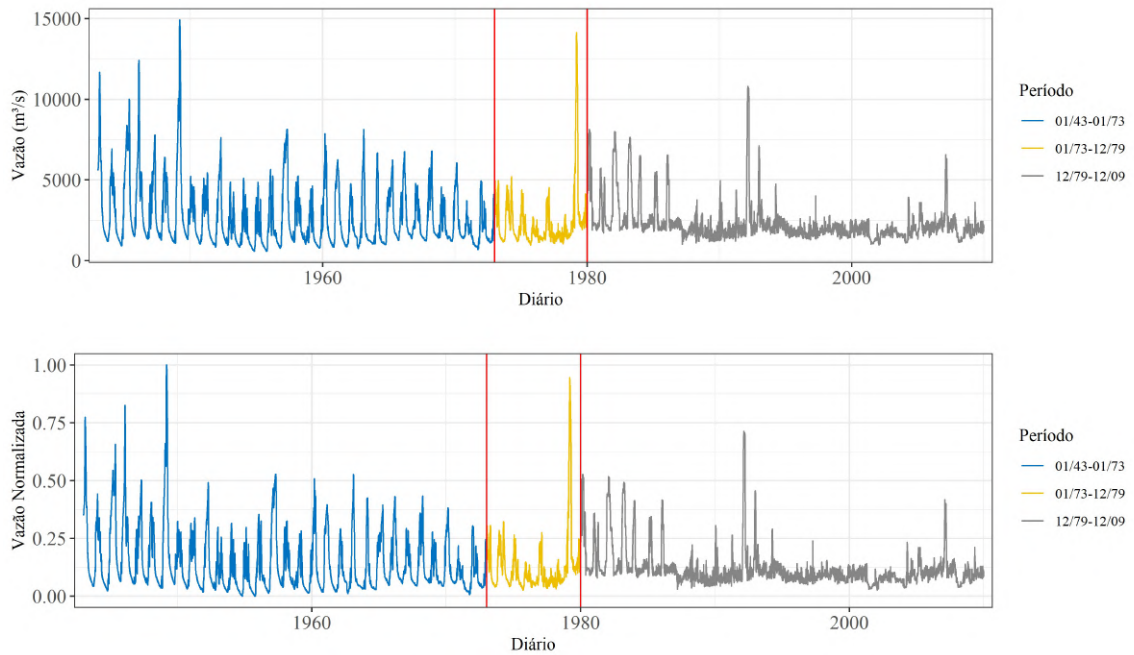


Figura 21 – Séries diárias de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

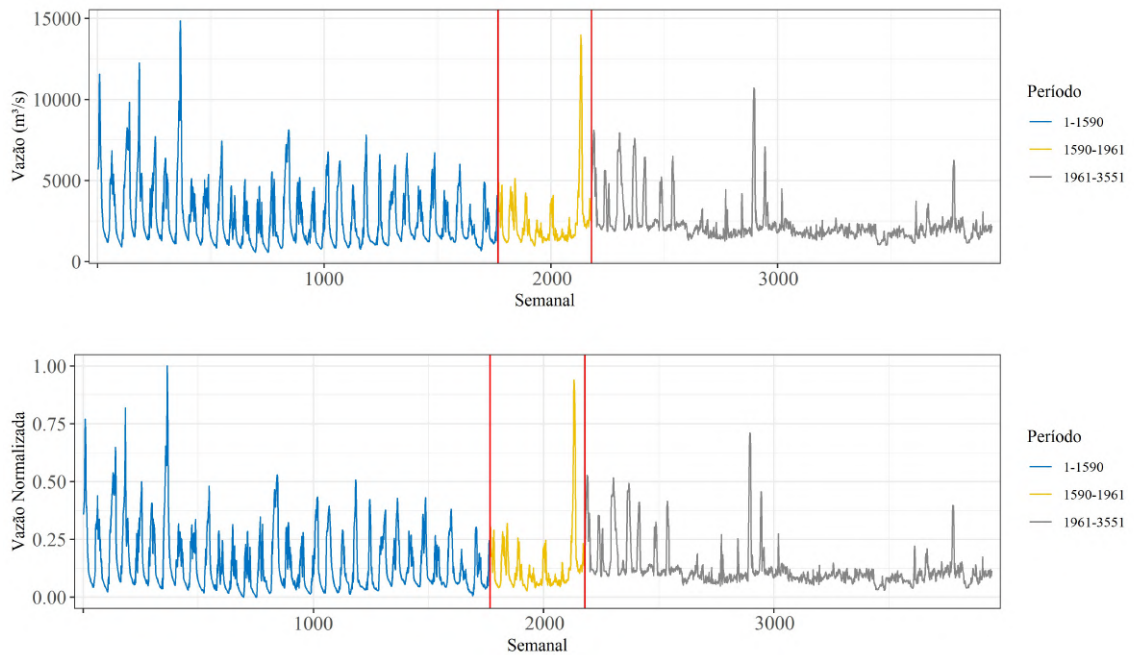


Figura 22 – Séries semanais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

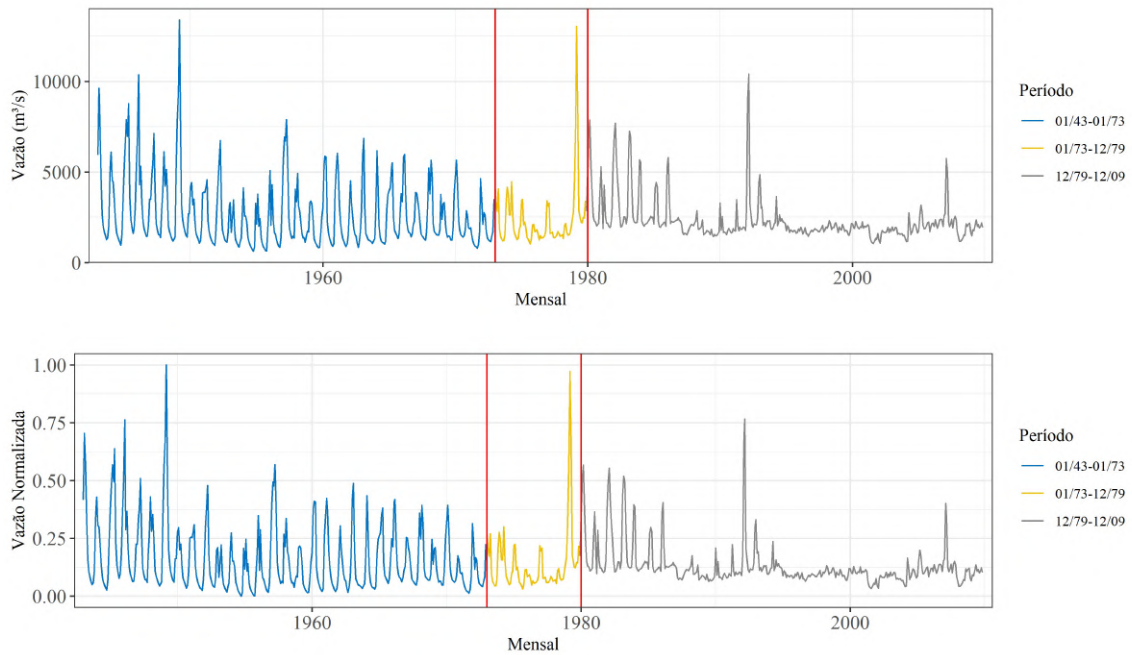


Figura 23 – Séries mensais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

A dimensão de imersão m é estimada pelo Método dos Falsos Vizinhos mais Próximos (FNN) (KENNEL; BROWN; ABARBANEL, 1992), o retardo τ pelo Método de Informação Mútua (FRASER; SWINNEY, 1986) e o limiar ε determinado com uso do método iterativo sugerido por Webber-Jr e Zbilut (2005), que consiste na busca pelo limiar que produz um percentual entre 1% e 5% do valor da taxa de recorrência, $RR(\varepsilon)$, dada pela equação (2.7). A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros essenciais para a reconstrução do espaço de fase para as séries normalizadas em diferentes escalas temporais.

Tabela 6 – Parâmetros do RP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries temporais de vazões normalizados do Rio São Francisco da estação Juazeiro nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

	Diária		Semanal		Mensal	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
m	3	4	3	4	2	6
τ	9	9	9	9	8	7
ε	0,026	0,036	0,070	0,051	0,040	0,085

As figuras 24, 25 e 26 mostram os Gráficos de Recorrência para as diferentes escalas

(diária, semanal e mensal) temporais de vazão.

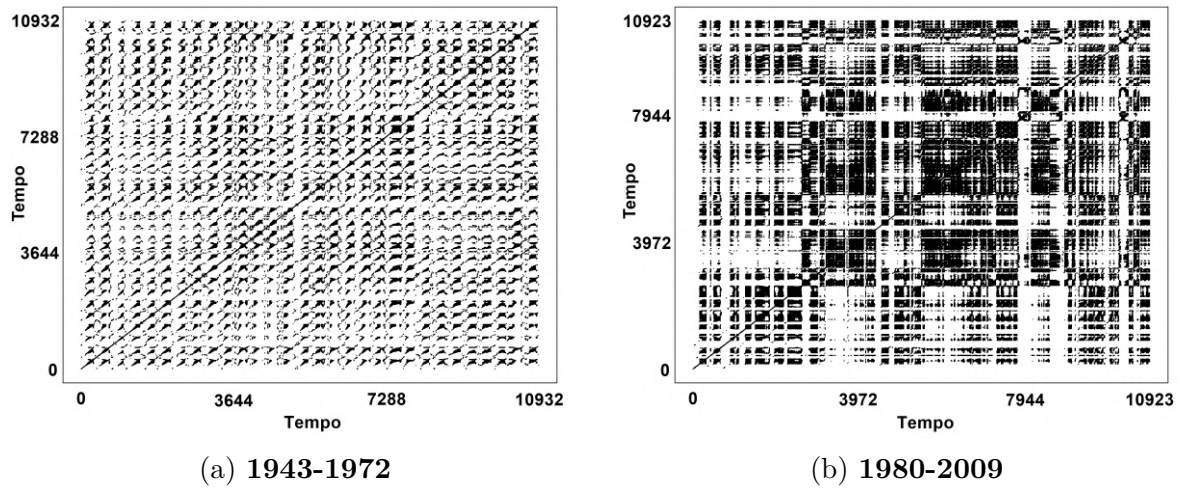


Figura 24 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries diárias da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

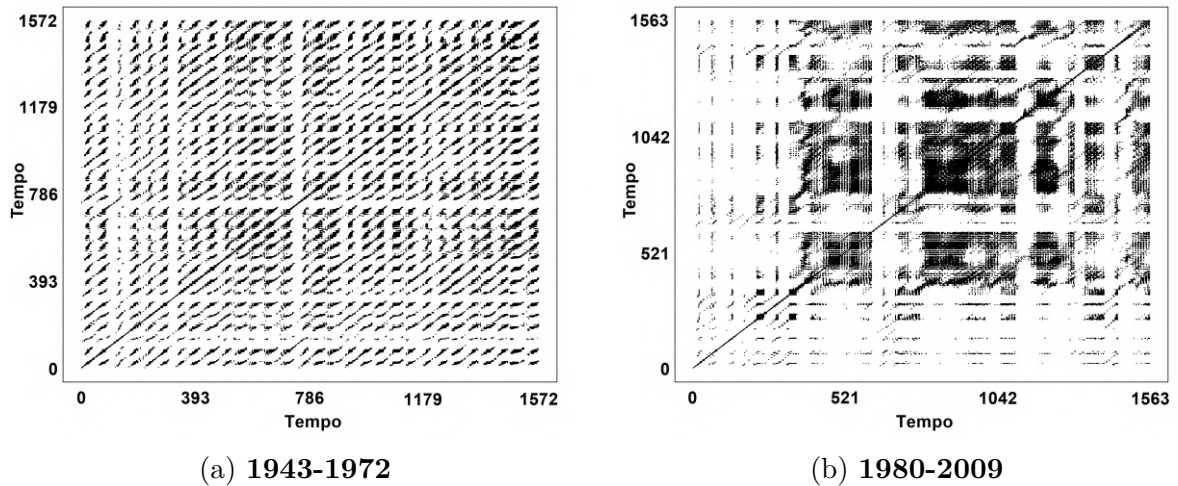


Figura 25 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries semanais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

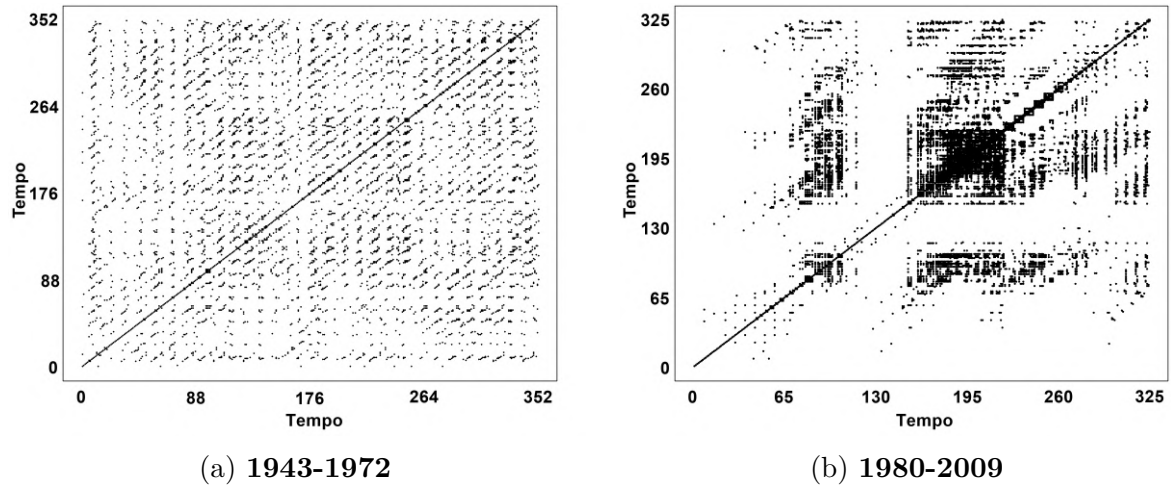


Figura 26 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

Observa-se que os RPs das subséries antes da construção de Sobradinho contêm blocos com linhas diagonais indicando comportamento periódico (devido a sazonalidade anual). Depois da construção, o padrão de RP mudou e apresenta faixas brancas, indicando mudanças repentinas ou eventos extremos (MARWAN et al., 2007). Este efeito foi mais pronunciado na escala mensal (Figura 26) e descreve variabilidade interanual de vazão. Nas escalas semanais (Figura 25) e mensais (Figura 26) foi observado o efeito “deriva” - redução dos pontos recorrentes nos cantos superior esquerdo e inferior direito. Este padrão RP é causado por sistemas que possuem parâmetros que mudam lentamente, isto é, sistemas não estacionários (MARWAN et al., 2007).

Os valores da Análise de Quantificação de Recorrência das séries de vazão para os períodos anterior e posterior a construção da barragem são exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) a construção da barragem de Sobradinho.

	Diário		Semanal		Mensal	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
REC	0,035*	0,027	0,041	0,034	0,024	0,038
DET	0,993	0,750	0,861	0,711	0,412	0,587
L	22,102	3,781	4,778	3,038	2,511	3,266
L_{max}	744	392	85	68	6	83
ENTR	3,699	1,687	2,135	1,387	0,959	1,293
LAM	0,996	0,847	0,913	0,826	0,394	0,716
TT	27,008	5,007	5,388	3,911	2,238	3,900

*Valores mais altos estão destacados em negritos. REC – taxa de recorrência; DET – determinismo; L – comprimento médio da diagonal; L_{max} – comprimento máximo da diagonal; ENTR – entropia; LAM – laminaridade; TT – tempo de permanência.

Nota-se que, para as séries diárias e semanais, que descrevem variabilidade intra-anual de vazão, todos os valores de RQA diminuíram após a construção da barragem Sobradinho indicando que a construção da barragem alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime menos regular (menor REC), menos previsível (menor DET, L e L_{max}), menos complexo (menor ENTR), e menos estável (menor LAM e TT). Este efeito é mais pronunciado na escala temporal diária. Na escala mensal, que descreve variabilidade interanual de vazão, todos os valores de RQA aumentaram, indicando que a construção da barragem alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime mais regular (maior REC), mais previsível (maior DET, L e L_{max}), mais complexo (maior ENTR), e mais estável (maior LAM e TT).

Além disso, pode-se observar que para o período anterior a construção os valores do RQA diminuem (exceto REC) ao longo das escalas temporais, ou seja, de 1 dia para 30 dias. Para o período após a construção, esse comportamento não é observado. Resultado semelhante foi encontrado no estudo de Shu et al. (2021), onde examinaram a dinâmica da chuva em diferentes escalas temporais (diária, 2 dias e 4 dias), o resultado mostra que a complexidade da dinâmica da chuva depende fortemente da mudança da escala temporal.

4.3 Gráfico de Recorrência Cruzada entre a vazão e a precipitação.

Nesta seção são apresentados os resultados de análise do Gráfico de Recorrência Cruzada (CRP) das séries mensais normalizadas (obtidas usando Equação 3.2) de vazão

e de precipitação das estações fluviométrica e pluviométrica de Juazeiro (BA). As séries analisadas são apresentadas nas figuras 27 e 28.

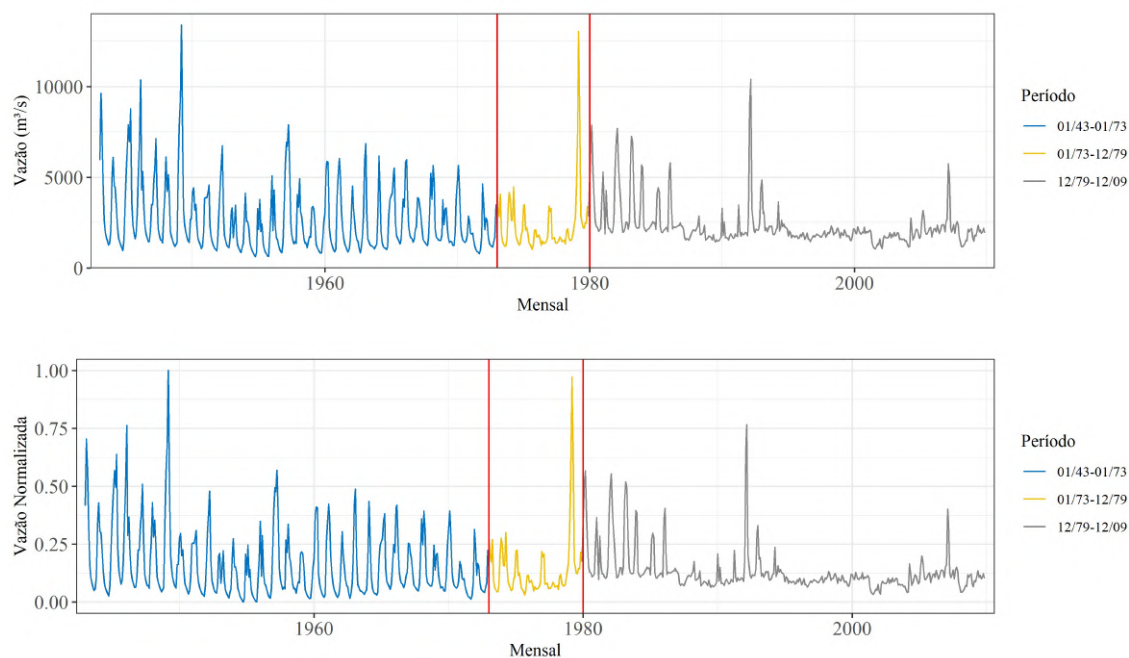


Figura 27 – Séries mensais de vazão e vazão normalizada do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

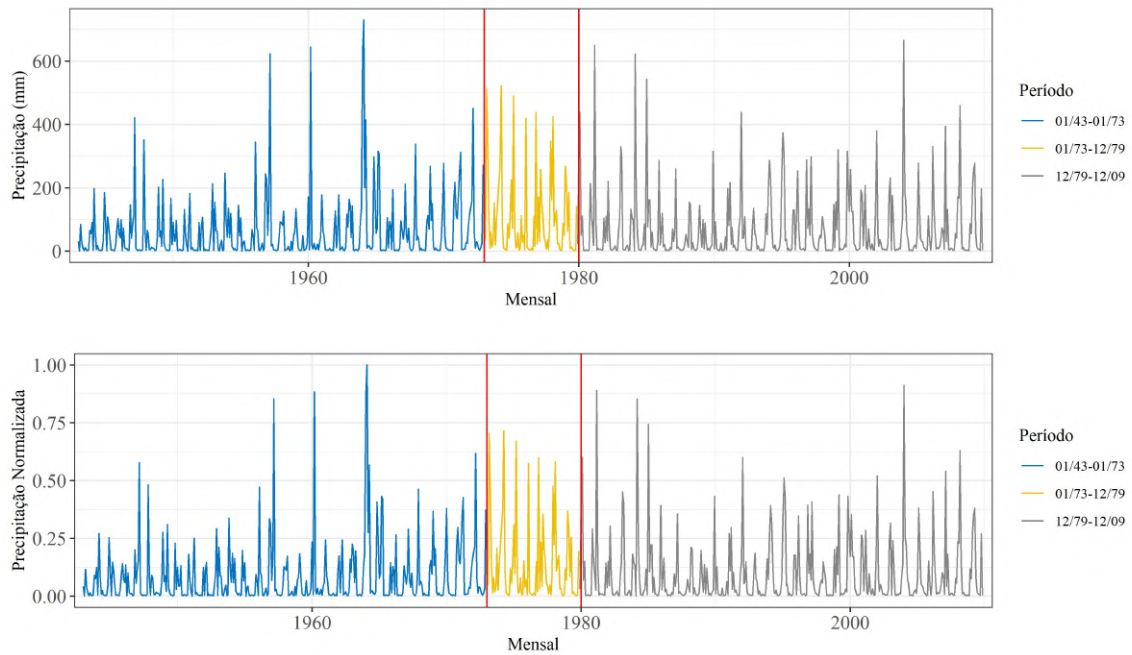


Figura 28 – Séries mensais de precipitação e precipitação normalizada na bacia do Rio São Francisco (estação Juazeiro). As cores correspondem aos períodos de antes (azul), durante (amarelo) e depois (cinza) da construção da barragem de Sobradinho. Barras vermelhas limitam o período da construção da barragem.

A dimensão de imersão m é estimada pelo Método dos Falsos Vizinhos mais Próximos (FNN) (KENNEL; BROWN; ABARBANEL, 1992), o retardo τ pelo Método de Informação Mútua (FRASER; SWINNEY, 1986) e o limiar ε determinado com uso do método iterativo sugerido por Webber-Jr e Zbilut (2005), que consiste na busca pelo limiar que produz um percentual entre 1% e 5% do valor da taxa de recorrência, $RR(\varepsilon)$, dada pela equação (2.7). A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros essenciais para a reconstrução do espaço de fase para séries normalizadas (obtidas usando Equação 3.2).

Tabela 8 – Parâmetros do RP/CRP (dimensão de imersão m , o retardo τ , e o limiar ε) a partir das séries temporais normalizadas de vazão e precipitação da bacia do Rio São Francisco, da estação de Juazeiro, nos períodos antes (1943-1972) e depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

	RP - Vazão		RP - Precipitação		CRP	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
m	2	6	2	2	2	6
τ	8	7	4	8	3	4
ε	0,040	0,085	0,023	0,028	0,036	0,135

Os Gráficos de Recorrência das séries de vazão e de precipitação e o Gráfico de

Recorrência Cruzada entre duas variáveis são mostrados nas figuras 29,30 e 31 respectivamente.

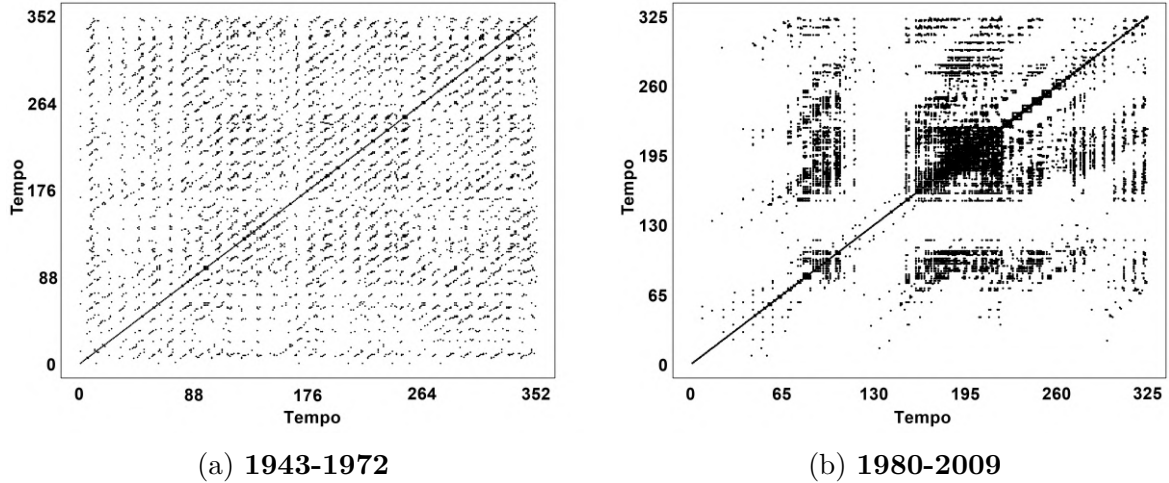


Figura 29 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da vazão do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

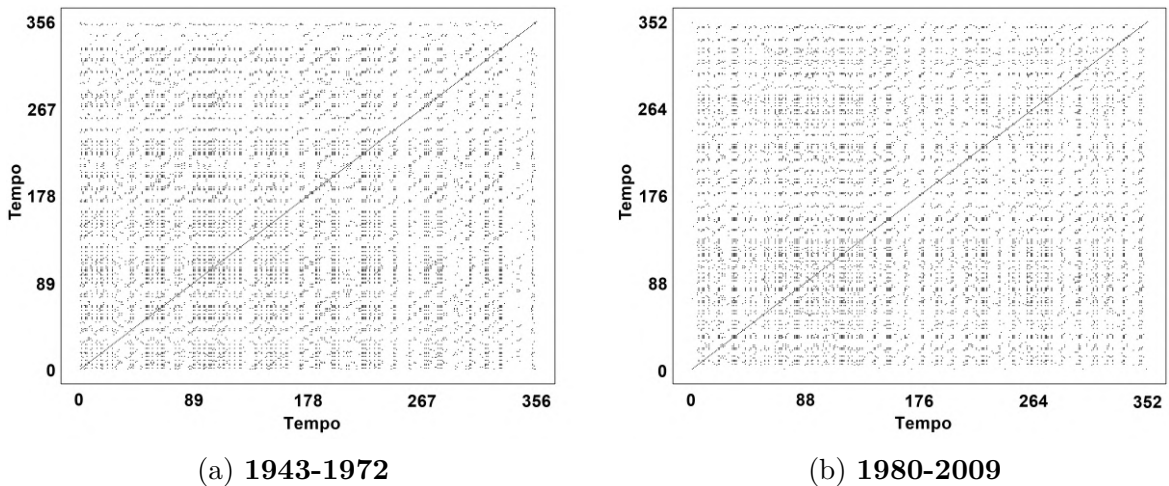


Figura 30 – Gráficos de Recorrência (RPs) das séries mensais da precipitação do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

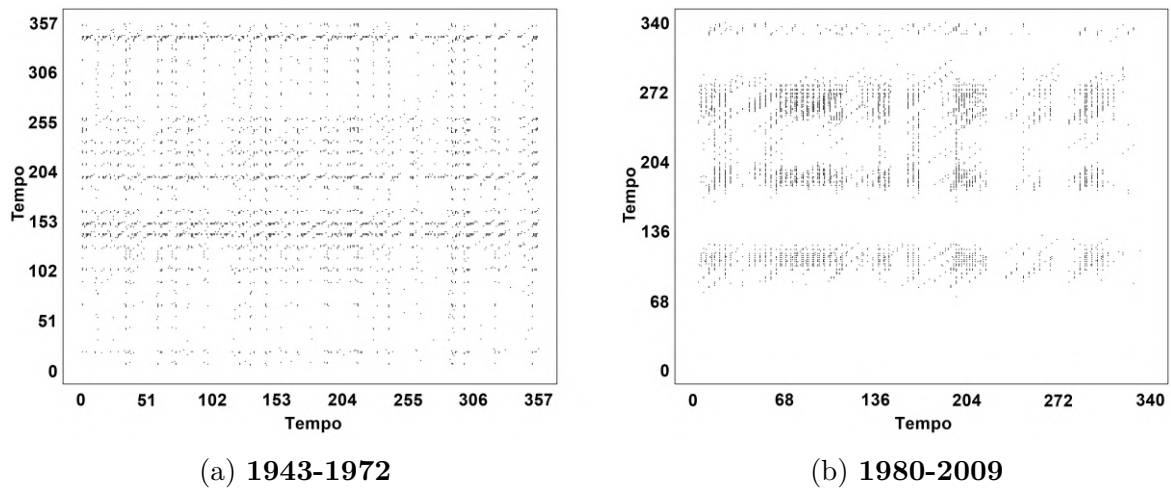


Figura 31 – Gráficos de Recorrência Cruzada (CRP) das séries mensais da vazão e precipitação do Rio São Francisco da estação Juazeiro no período (a) antes da construção (1943-1972) e (b) depois da construção (1980-2009) da barragem de Sobradinho.

Observa-se que os gráficos RP de precipitação (Figura 30) são similares para os períodos antes e depois de construção de Sobradinho, contém blocos com linhas diagonais indicando comportamento periódico (devido a sazonalidade anual). A dinâmica de vazão (Figura 29) também apresentou RP com blocos de linhas diagonais (periodicidade) antes da construção de Sobradinho, seguindo a dinâmica de precipitação. Depois da construção, o padrão de RP apresentou faixas brancas, indicando as mudanças repentinas. Este resultado pode ser confirmado na Figura 27, a mudança repentina indicada por faixa branca no período 84-156 meses observada na Figura 29 corresponde ao período 1987-1993 observado na Figura 27.

O padrão de RP de vazão deriva - redução dos pontos recorrentes nos cantos superior esquerdo e inferior direito, (indica que neste período a dinâmica é caracterizada por parâmetros que mudam lentamente, em geral, sistemas não estacionários) também pode ser confirmado na Figura 27, depois 1995 houve uma significativa diminuição de vazão, com pequenas variações temporais resultando na diminuição de pontos recorrentes nos cantos superior esquerdo e inferior direito. Esta mudança no regime de vazão depois 1995 pode ser atribuída à construção de barragem e reservatório Xingó. Depois do início da operação de Xingó, em 1994 (CHESF, 2024), as duas barragens começaram operar em sincronização, e Sobradinho deixou de ser o único reservatório para controle da vazão do rio.

Os gráficos CRP (Figura 31) mostram pontos recorrentes nos instantes do tempo quando as trajetórias de espaço de fase de vazão (precipitação) passam pela vizinhança das trajetórias no espaço de fase de precipitação (vazão). Para o período anterior a construção

de Sobradinho, o CRP é similar ao RP de vazão e precipitação, os pontos recorrentes são presentes no gráfico todo, indicando alto nível de sincronização entre a variabilidade temporal de vazão e de precipitação.

Depois da construção, o CRP apresenta faixas brancas indicando mudanças abruptas entre os períodos com baixa sincronização (ausência de pontos recorrentes) e períodos com maior sincronização (presença de pontos recorrentes). Essas observações são confirmadas pelos resultados do RQA mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Análise de Quantificação de Recorrência (RQA) da vazão e precipitação do Rio São Francisco da estação de Juazeiro no período anterior (1943-1972) e posterior (1980-2009) a construção da barragem de Sobradinho.

	Vazão (RQA)		Precipitação (RQA)		CRQA	
	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009	1943-1972	1980-2009
REC	0,024	0,038*	0,043	0,041	0,032	0,031
DET	0,412	0,587	0,273	0,258	0,295	0,150
L	2,511	3,266	2,161	2,215	2,311	2,031
L_{max}	6	83	5	5	6	3
ENTR	0,959	1,293	0,463	0,564	0,713	0,137
LAM	0,394	0,716	0,448	0,432	0,343	0,211
TT	2,238	3,900	2,285	2,605	2,719	2,069

*Valores mais altos estão destacados em negritos. REC – taxa de recorrência; DET – determinismo; L – comprimento médio da diagonal; L_{max} – comprimento máximo da diagonal; ENTR – entropia; LAM – laminaridade; TT – tempo de permanência.

Nota-se que, após a construção da barragem Sobradinho todos os valores de RQA da vazão para estação Juazeiro aumentaram, indicando que a construção da barragem alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime mais regular (maior REC), mais previsível (maior DET, L e L_{max}), mais complexo (maior ENTR), e mais estável (maior LAM e TT), enquanto, os valores de RQA de precipitação permaneceram semelhantes para todo o período. Comparando os valores de RQA de vazão e de precipitação durante o regime natural (antes de construção de Sobradinho), nota-se que, a dinâmica de vazão foi mais previsível (maior DET, L e L_{max}) do que dinâmica de precipitação que pode ser o resultado da influência de outros fatores como evaporação, umidade do solo e cobertura vegetal (intercepção da precipitação pelas copas de vegetação). Como todos os valores de RQA da vazão aumentaram depois de construção do Sobradinho e os valores de RQA de precipitação permanecem semelhantes, a sincronização entre a dinâmica de vazão e precipitação diminuiu depois da construção, gerando menores valores de CRQA para o segundo período.

5 Conclusão

Neste trabalho foi usada uma análise quantitativa baseada em recorrência nas séries temporais de vazão e precipitação na bacia do Rio São Francisco. Para identificar as mudanças no regime de vazões causada pela construção de barragem e reservatório Sobradinho, aplicou-se o método Gráfico de Recorrência (*Recurrence Plot* – RP), na sua forma original (baseando as recorrências em “distância” entre os estados do sistema dinâmico, que contém a informação sobre os valores das séries) e em sua modificação Gráfico de Recorrência de Padrões Ordinais (*Ordinal Pattern Recurrence Plot* – OPRP) em que as recorrências são definidas como repetição de estados, padrões ordinais que contém a informação sobre a ordenação local dos valores da série.

Analysaram-se as séries de vazão (em diferentes escalas temporais) para períodos antes e depois de construção da barragem Sobradinho, comparando os índices de Análise de Quantificação de Recorrência (*Recurrence Quantification Analysis* – RQA). Por fim, investigou-se a relação entre as variáveis vazão e precipitação através do método Gráfico de Recorrência Cruzada (*Cross Recurrence Plot* - CRP).

Comparando os resultados da RQA para RP e OPRP, pode-se concluir que o OPRP é mais sensível na detecção das alterações hidrológicas causadas pela atividade humana (construção das barragens e reservatórios). Os valores dos parâmetros de RQA obtidos do OPRP para os períodos antes e depois da construção da barragem de Sobradinho na região submédia da bacia mostraram que a operação da barragem induziu mudanças na dinâmica de vazão a jusante para um regime menos previsível e menos estável.

Analizando a evolução temporal dos índices de RQA do OPRP (calculados em janelas móveis), observou-se que a estação São Francisco, que não foi impactada pela barragem de Sobradinho, apresentou mudanças de vazão semelhante após a construção da barragem de Três Marias, localizada a montante, embora menos pronunciadas devido à maior distância da barragem.

Os RPs mostraram que depois da construção da barragem houve alteração na dinâmica da vazão para todas as escalas temporais analisadas (diária, semanal e mensal). A partir da RQA para as séries diária e semanal, concluiu-se que todos os valores diminuíram após a construção da barragem Sobradinho, indicando que a construção alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime menos regular, previsível, complexo e estável. Para a escala mensal, todos os valores de RQA aumentaram, indicando que a construção da

barragem alterou a dinâmica de vazão na direção de um regime mais regular, previsível, complexo e estável. Observa-se também que para o período anterior à construção os valores do RQA diminuem (exceto para o REC) ao longo da escala temporal, mostrando que a complexidade da dinâmica de vazão depende da mudança da escala temporal analisada.

A partir da análise entre vazão e precipitação, observou-se que para o período anterior à construção de Sobradinho, o CRP é similar aos RPs de vazão e precipitação; ou seja, alto nível de sincronização entre a variabilidade temporal de vazão e de precipitação. Enquanto isso, para o período posterior à construção, o CRP apresenta faixas brancas, indicando mudanças repentinas entre a variabilidade temporal de vazão e de precipitação, e uma diminuição de sincronização entre os processos hidrológicos da bacia. Comparando os valores de RQA de vazão e precipitação durante o regime natural, nota-se que a dinâmica de vazão foi mais previsível do que a dinâmica de precipitação, o que pode ser resultado da influência de outros fatores como evaporação, umidade do solo e cobertura vegetal.

O método do Gráfico de Recorrência apresenta bom desempenho para séries temporais curtas, mesmo para 50 - 100 dados (GOSWAMI, 2019) e pode ser aplicado em pequenas janelas, o que o torna uma ferramenta promissora para análise de flutuações de vazão em tempo real e, assim, servir de auxílio para a operação da barragem de forma a fornecer seus principais serviços, mas preservando a estrutura dinâmica das flutuações de vazão do regime natural. A partir dos resultados, espera-se contribuir na literatura com novas informações sobre a influência de atividade humana na dinâmica de vazão e precipitação, contribuindo, assim, para a na modelagem e previsão meteorológica e hidrológica, em busca de auxiliar na mitigação de efeitos causados por desastres naturais e na gestão de recursos hídricos.

Estudos futuros devem incluir: i) dados de alta frequência (sub diários) para abordar a resposta da vazão à variabilidade intra-anual das operações dos reservatórios relacionadas aos estados atual de disponibilidade e demanda de água; ii) a análise RQA dos dados pluviométricos (com base tanto no RP quanto no OPRP) para mapear a compreensão da dinâmica de chuva, uma vez que a precipitação é o principal insumo climatológico nas bacias hidrográficas.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA-ÑAÑAY, A. F.; BENITO, R. M.; QUEMADA, M.; LOSADA, J. C.; TARQUIS, A. M. Recurrence plots for quantifying the vegetation indices dynamics in a semi-arid grassland. *Geoderma*, Elsevier, v. 406, p. 115488, 2022.
- ANA. *Agência Nacional de Água*. 2024. <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acessado em 10/01/2024.
- ARAUJO, M. V. O.; CELESTE, A. B. Rescaled range analysis of streamflow records in the são francisco river basin, brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 135, p. 249–260, 2019.
- BANDT, C.; POMPE, B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series. *Physical review letters*, APS, v. 88, n. 17, p. 174102, 2002.
- BANERJEE, A.; GOSWAMI, B.; HIRATA, Y.; EROGLU, D.; MERZ, B.; KURTHS, J.; MARWAN, N. Recurrence analysis of extreme event-like data. *Nonlinear processes in geophysics*, Copernicus GmbH, v. 28, n. 2, p. 213–229, 2021.
- BARRETO, Í. D. de C.; SANTOS, E. F. N.; STOSIC, T. Análise de fisher-shannon da vazão do rio são francisco: a influência de barragens e reservatórios. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, p. e5159108852–e5159108852, 2020.
- BARRETO, I. D. de C.; STOSIC, T.; FILHO, M. C.; DELRIEUX, C.; SINGH, V. P.; STOSIC, B. Complexity analyses of sao francisco river streamflow: influence of dams and reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 25, n. 10, p. 05020036, 2020.
- BASTOS, J. A.; CAIADO, J. Recurrence quantification analysis of global stock markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 390, n. 7, p. 1315–1325, 2011.
- BERNARDI, E. C. S.; PANZIERA, A. G.; BURIOL, G. A.; SWAROWSKY, A. Bacia hidrográfica como unidade de gestão ambiental. *Disciplinarum Scientia/ Naturais e Tecnológicas*, v. 13, n. 2, p. 159–168, 2012.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, L. L.; SILVA, C. M. Santos e; CARVALHO, G. G. de. Changes of precipitation extremes indices in são francisco river basin, brazil from 1947 to 2012. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 135, p. 565–576, 2019.
- BOTTER, G.; BASSO, S.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. Natural streamflow regime alterations: Damming of the piave river basin (italy). *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 46, n. 6, 2010.

CARVALHO, A. P. V.; BRUMATTI, D. V.; DIAS, H. C. T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. *Revista brasileira de agropecuária sustentável*, 2012.

CBHSF. *Comitê da bacia hidrográfica do rio São Francisco*. 2024. <<https://cbhsaofrancisco.org.br/>>. Acessado em 10/01/2024.

CEMIG. *Companhia Energética de Minas Gerais*. 2024. <<https://www.cemig.com.br/usina/tres-marias/>>. Acessado em 10/01/2024.

CHEN, Y.; LIN, A. Order pattern recurrence for the analysis of complex systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 607, p. 128204, 2022.

CHESF. *Companhia Hidro Elétrica do São Francisco*. 2024. <<https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/SistemasGeracao.aspx/>>. Acessado em 10/01/2024.

CHRISTENSEN, N. S.; WOOD, A. W.; VOISIN, N.; LETTENMAIER, D. P.; PALMER, R. N. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the colorado river basin. *Climatic change*, Springer, v. 62, p. 337–363, 2004.

COCO, M. I.; MØNSTER, D.; LEONARDI, G.; DALE, R.; WALLOT, S. Unidimensional and multidimensional methods for recurrence quantification analysis with crqa. *arXiv preprint arXiv:2006.01954*, 2020.

DONNER, R. V.; BALASIS, G.; STOLBOVA, V.; GEORGIOU, M.; WIEDERMANN, M.; KURTHS, J. Recurrence-based quantification of dynamical complexity in the earth's magnetosphere at geospace storm timescales. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 124, n. 1, p. 90–108, 2019.

ECKMANN, J. P.; KAMPHORST, S. O.; RUELLE, D. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters*, v. 4, p. 973–977, 1987.

ELY, P.; FANTIN-CRUZ, I.; TRITICO, H. M.; GIRARD, P.; KAPLAN, D. Dam-induced hydrologic alterations in the rivers feeding the pantanal. *Frontiers in Environmental Science*, Frontiers Media SA, v. 8, p. 579031, 2020.

FRAGKOU, A.; CHARAKOPOULOS, A.; KARAKASIDIS, T.; LIAKOPOULOS, A. Non-linear analysis of river system dynamics using recurrence quantification analysis. *AppliedMath*, MDPI, v. 2, n. 1, p. 1–15, 2022.

FRASER, A. M.; SWINNEY, H. L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical review A*, APS, v. 33, n. 2, p. 1134, 1986.

FREITAS, A. A.; DRUMOND, A.; CARVALHO, V. S.; REBOITA, M. S.; SILVA, B. C.; UVO, C. B. Drought assessment in são francisco river basin, brazil: characterization through spi and associated anomalous climate patterns. *Atmosphere*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 1, p. 41, 2022.

GILLAND, T.; FOX, L. J.; ANDRUCZYK, M.; FRENCH, S.; SWANSON, L. et al. What is a watershed? Virginia Cooperative Extension, 2009.

- GOSWAMI, B. A brief introduction to nonlinear time series analysis and recurrence plots. *Vibration*, MDPI, v. 2, n. 4, p. 332–368, 2019.
- GRUSZCZYŃSKA, I.; MOSDORF, R.; SOBANIEC, P.; ŻOCHOWSKA-SOBANIEC, M.; BOROWSKA, M. Epilepsy identification based on eeg signal using rqa method. *Advances in medical sciences*, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 58–64, 2019.
- GUPTA, H.; KAO, S.-J.; DAI, M. The role of mega dams in reducing sediment fluxes: A case study of large asian rivers. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 464, p. 447–458, 2012.
- HAN, X.; SIVAKUMAR, B.; WOLDMESKEL, F. M.; AGUILAR, M. Guerra de. Temporal dynamics of streamflow: application of complex networks. *Geoscience Letters*, Springer, v. 5, p. 1–15, 2018.
- HUANG, F.; XIA, Z.; ZHANG, N.; ZHANG, Y.; LI, J. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the yangtze river, china. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 16, n. 11, p. 914–919, 2011.
- HWANG, J.; KUMAR, H.; RUHI, A.; SANKARASUBRAMANIAN, A.; DEVINENI, N. Quantifying dam-induced fluctuations in streamflow frequencies across the colorado river basin. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 57, n. 10, p. e2021WR029753, 2021.
- JALÓN, S. G. de; TÁNAGO, M. G. D.; JALÓN, D. G. de. A new approach for assessing natural patterns of flow variability and hydrological alterations: The case of the spanish rivers. *Journal of environmental management*, Elsevier, v. 233, p. 200–210, 2019.
- KANTELHARDT, J. W.; KOSCIELNY-BUNDE, E.; RYBSKI, D.; BRAUN, P.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 111, n. D1, 2006.
- KANTZ, H.; SCHREIBER, T. *Nonlinear time series analysis*. [S.l.]: Cambridge university press, 2004. v. 7.
- KENNEL, M. B.; BROWN, R.; ABARBANEL, H. D. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical review A*, APS, v. 45, n. 6, p. 3403, 1992.
- KONDOLF, G. M.; BOULTON, A. J.; O'DANIEL, S.; POOLE, G. C.; RAHEL, F. J.; STANLEY, E. H.; WOHL, E.; BÅNG, A.; CARLSTROM, J.; CRISTONI, C. et al. Process-based ecological river restoration: visualizing three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages. *Ecology and society*, JSTOR, v. 11, n. 2, 2006.
- LI, Z.; ZHANG, Y.-K. Multi-scale entropy analysis of mississippi river flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Springer, v. 22, p. 507–512, 2008.
- LIMA, C. E. S.; SILVA, M. V. M. da; ROCHA, S. M. G.; SILVEIRA, C. d. S. Anthropic changes in land use and land cover and their impacts on the hydrological variables of the são francisco river basin, brazil. *Sustainability*, MDPI, v. 14, n. 19, p. 12176, 2022.

- LIMA, W. d. P. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas. 2008.
- LUCAS, M. C.; KUBLIK, N.; RODRIGUES, D. B.; NETO, A. A. M.; ALMAGRO, A.; MELO, D. d. C.; ZIPPER, S. C.; OLIVEIRA, P. T. S. Significant baseflow reduction in the sao francisco river basin. *Water*, MDPI, v. 13, n. 1, p. 2, 2020.
- MAGILLIGAN, F. J.; NISLOW, K. H. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, Elsevier, v. 71, n. 1-2, p. 61–78, 2005.
- MANETA, M.; TORRES, M.; WALLENDER, W. W.; VOSTI, S.; KIRBY, M.; BASSOI, L. H.; RODRIGUES, L. Water demand and flows in the são francisco river basin (brazil) with increased irrigation. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 96, n. 8, p. 1191–1200, 2009.
- MARWAN, N. Encounters with neighbours. *University of Potsdam*, 2003.
- MARWAN, N.; KURTHS, J. Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 302, n. 5-6, p. 299–307, 2002.
- MARWAN, N.; KURTHS, J. Line structures in recurrence plots. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 336, n. 4-5, p. 349–357, 2005.
- MARWAN, N.; ROMANO, M. C.; THIEL, M.; KURTHS, J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics reports*, Elsevier, v. 438, n. 5-6, p. 237–329, 2007.
- MARWAN, N.; THIEL, M.; NOWACZYK, N. R. Cross recurrence plot based synchronization of time series. *Nonlinear processes in Geophysics*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 9, n. 3/4, p. 325–331, 2002.
- MARWAN, N.; WESSEL, N.; MEYERFELDT, U.; SCHIRDEWAN, A.; KURTHS, J. Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. *Physical review E*, APS, v. 66, n. 2, p. 026702, 2002.
- MINDLIN, G. M.; GILMORE, R. Topological analysis and synthesis of chaotic time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Elsevier, v. 58, n. 1-4, p. 229–242, 1992.
- MOCENNI, C.; FACCHINI, A.; VICINO, A. Comparison of recurrence quantification methods for the analysis of temporal and spatial chaos. *Mathematical and Computer Modelling*, Elsevier, v. 53, n. 7-8, p. 1535–1545, 2011.
- MUKHERJEE, S. Nonlinear recurrence quantification of the monsoon-season heavy rainy-days over northwest himalaya for the baseline and future periods. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 789, p. 147754, 2021.
- NOURANI, V.; KISI, Ö.; KOMASI, M. Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 402, n. 1-2, p. 41–59, 2011.
- OGUNJO, S.; OLUSOLA, A.; FUWAPE, I.; DUROWOJU, O. Temporal variation in deterministic chaos: the influence of kainji dam on downstream stations along lower niger river. *Arabian Journal of Geosciences*, Springer, v. 15, n. 3, p. 237, 2022.

- ONS. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. 2023. <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/reservatorios>>. Acessado em 04/01/2023.
- PALMER, M. A.; LIERMANN, C. A. R.; NILSSON, C.; FLÖRKE, M.; ALCAMO, J.; LAKE, P. S.; BOND, N. Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, Wiley Online Library, v. 6, n. 2, p. 81–89, 2008.
- PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; KUMAR, T. L.; THAKUR, M. K.; BURITI, C. d. O.; UZCÁTEGUI-BRICEÑO, C. Drought assessment in the são francisco river basin using satellite-based and ground-based indices. *Remote Sensing*, MDPI, v. 13, n. 19, p. 3921, 2021.
- PETRAUSKIENE, V.; PAL, M.; CAO, M.; WANG, J.; RAGULSKIS, M. Color recurrence plots for bearing fault diagnosis. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 22, p. 8870, 2022.
- PFIRMAN, S. *Complex environmental systems: synthesis for earth, life, and society in the 21st century: A 10-year outlook for the National Science Foundation*. [S.l.]: National Science Foundation, 2003.
- POFF, N. L.; OLDEN, J. D.; MERRITT, D. M.; PEPIN, D. M. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 104, n. 14, p. 5732–5737, 2007.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, 2023.
- RICHTER, B. D.; THOMAS, G. A. Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecology and society*, JSTOR, v. 12, n. 1, 2007.
- RILEY, E.; ORDEN, G. V. Tutorials in contemporary nonlinear methods. *National Science Foundation*, 2005.
- SAHAGIAN, D. Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution. *Global and Planetary Change*, Elsevier, v. 25, n. 1-2, p. 39–48, 2000.
- SANTANA, D. P. *Manejo integrado de Bacias Hidrográficas*. [S.l.]: Embrapa Milho e Sorgo Sete Lagoas, 2003.
- SANTOS, C. A. G.; MORAIS, B. S. de. Identification of precipitation zones within são francisco river basin (brazil) by global wavelet power spectra. *Hydrological sciences journal*, Taylor & Francis, v. 58, n. 4, p. 789–796, 2013.
- SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B.; PASSOS, J. S. d. A.; SILVA, R. M. da. Drought assessment using a trmm-derived standardized precipitation index for the upper são francisco river basin, brazil. *Environmental monitoring and assessment*, Springer, v. 189, p. 1–19, 2017.
- SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B.; SILVA, R. M. da; PASSOS, J. S. d. A. Integrated spatiotemporal trends using trmm 3b42 data for the upper são francisco river basin, brazil. *Environmental monitoring and assessment*, Springer, v. 190, p. 1–20, 2018.

- SANTOS, H. de Andrade e; POMPEU, P. dos S.; KENJI, D. O. L. Changes in the flood regime of são francisco river (brazil) from 1940 to 2006. *Regional Environmental Change*, Springer, v. 12, p. 123–132, 2012.
- SCHINKEL, S.; MARWAN, N.; KURTHS, J. Order patterns recurrence plots in the analysis of erp data. *Cognitive neurodynamics*, Springer, v. 1, p. 317–325, 2007.
- SEMERARO, T.; LUVISI, A.; LILLO, A. O.; ARETANO, R.; BUCCOLIERI, R.; MARWAN, N. Recurrence analysis of vegetation indices for highlighting the ecosystem response to drought events: An application to the amazon forest. *Remote Sensing*, MDPI, v. 12, n. 6, p. 907, 2020.
- SERPA, D.; NUNES, J.; SANTOS, J.; SAMPAIO, E.; JACINTO, R.; VEIGA, S.; LIMA, J.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; KEIZER, J. et al. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting mediterranean catchments. *Science of the Total Environment*, Elsevier, v. 538, p. 64–77, 2015.
- SHU, Z.; CHAN, P. W.; LI, Q.; HE, Y.; YAN, B. Characterization of daily rainfall variability in hong kong: A nonlinear dynamic perspective. *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, v. 41, p. E2913–E2926, 2021.
- SHU, Z.; JESSON, M.; STERLING, M. Nonlinear dynamic analysis of daily rainfall variability across the uk from 1989 to 2018. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 603, p. 126849, 2021.
- SIVAKUMAR, B. Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 5, n. 4, p. 645–652, 2001.
- SIVAKUMAR, B.; WALLENDER, W. W.; HORWATH, W. R.; MITCHELL, J. P.; PRENTICE, S. E.; JOYCE, B. A. Nonlinear analysis of rainfall dynamics in california's sacramento valley. *Hydrological Processes: An International Journal*, Wiley Online Library, v. 20, n. 8, p. 1723–1736, 2006.
- SIVAKUMAR, B.; WOLDEMESKEL, F. M.; PUENTE, C. E. Nonlinear analysis of rainfall variability in australia. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Springer, v. 28, p. 17–27, 2014.
- STOSIC, T.; TELESKA, L.; FERREIRA, D. V. de S.; STOSIC, B. Investigating anthropically induced effects in streamflow dynamics by using permutation entropy and statistical complexity analysis: A case study. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 540, p. 1136–1145, 2016.
- STRATIMIROVIC, D.; BATAS-BJELIC, I.; DJURDJEVIC, V.; BLESIC, S. Changes in long-term properties and natural cycles of the danube river level and flow induced by damming. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 566, p. 125607, 2021.
- STROZZI, F.; ZALDÍVAR, J.-M.; ZBILUT, J. P. Application of nonlinear time series analysis techniques to high-frequency currency exchange data. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 312, n. 3-4, p. 520–538, 2002.

- TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In: SPRINGER. *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*. [S.l.], 1981. p. 366–381.
- TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. d.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, guanhões-mg. *Revista Árvore*, SciELO Brasil, v. 30, p. 849–857, 2006.
- TRULLA, L.; GIULIANI, A.; ZBILUT, J.; JR, C. W. Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients. *Physics letters A*, Elsevier, v. 223, n. 4, p. 255–260, 1996.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. vol. 2, n. 1 (jun. 1997), p. 135-152*, 1997.
- VASCO, A. N. D.; NETTO, A. d. O. A.; SILVA, M. G. D. The influence of dams on ecohydrological conditions in the são francisco river basin, brazil. *Ecohydrology & Hydrobiology*, Elsevier, v. 19, n. 4, p. 556–565, 2019.
- WALLOT, S. Recurrence quantification analysis of processes and products of discourse: A tutorial in r. *Discourse Processes*, Taylor & Francis, v. 54, n. 5-6, p. 382–405, 2017.
- WALLOT, S. Multidimensional cross-recurrence quantification analysis (mdcrqa)—a method for quantifying correlation between multivariate time-series. *Multivariate behavioral research*, Taylor & Francis, v. 54, n. 2, p. 173–191, 2019.
- WANI, S. P.; GARG, K. K. Watershed management concept and principles. 2009.
- WEBBER-JR, C. L.; ZBILUT, J. P. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, v. 94, n. 2005, p. 26–94, 2005.
- WEI, G.; YANG, Z.; CUI, B.; LI, B.; CHEN, H.; BAI, J.; DONG, S. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the lancang river, china. *Water resources management*, Springer, v. 23, p. 1763–1780, 2009.
- WENDI, D.; MERZ, B.; MARWAN, N. Assessing hydrograph similarity and rare runoff dynamics by cross recurrence plots. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 55, n. 6, p. 4704–4726, 2019.
- WU, H.; CHEN, J.; XU, J.; ZENG, G.; SANG, L.; LIU, Q.; YIN, Z.; DAI, J.; YIN, D.; LIANG, J. et al. Effects of dam construction on biodiversity: A review. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 221, p. 480–489, 2019.
- YAN, B.; CHAN, P. W.; LI, Q.; HE, Y.; SHU, Z. Dynamic analysis of meteorological time series in hong kong: A nonlinear perspective. *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, v. 41, n. 10, p. 4920–4932, 2021.
- YANG, D.; REN, W.-X.; HU, Y.-D.; LI, D. Selection of optimal threshold to construct recurrence plot for structural operational vibration measurements. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 349, p. 361–374, 2015.

- ZBILUT, J. P.; GIULIANI, A.; WEBBER-JR, C. L. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 246, n. 1-2, p. 122–128, 1998.
- ZBILUT, J. P.; GIULIANI, A.; WEBBER-JR, C. L. Recurrence quantification analysis and principal components in the detection of short complex signals. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 237, n. 3, p. 131–135, 1998.
- ZBILUT, J. P.; THOMASSON, N.; WEBBER, C. L. Recurrence quantification analysis as a tool for nonlinear exploration of nonstationary cardiac signals. *Medical engineering & physics*, Elsevier, v. 24, n. 1, p. 53–60, 2002.
- ZBILUT, J. P.; WEBBER-JR, C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics letters A*, Elsevier, v. 171, n. 3-4, p. 199–203, 1992.
- ZBILUT, J. P.; ZALDIVAR-COMENGES, J.-M.; STROZZI, F. Recurrence quantification based liapunov exponents for monitoring divergence in experimental data. *Physics Letters A*, Elsevier, v. 297, n. 3-4, p. 173–181, 2002.
- ZHANG, Q.; ZHOU, Y.; SINGH, V. P.; CHEN, X. The influence of dam and lakes on the yangtze river streamflow: long-range correlation and complexity analyses. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, v. 26, n. 3, p. 436–444, 2012.
- ZHANG, X.; DONG, Z.; GUPTA, H.; WU, G.; LI, D. Impact of the three gorges dam on the hydrology and ecology of the yangtze river. *Water*, MDPI, v. 8, n. 12, p. 590, 2016.
- ZHOU, Y.; ZHANG, Q.; SINGH, V. P. 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*, Springer, v. 28, p. 263–279, 2014.
- ZOLOTOVA, N.; PONYAVIN, D. Phase asynchrony of the north-south sunspot activity. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 449, n. 1, p. L1–L4, 2006.