



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ MATHEUS COELHO OLIVEIRA

ANÁLISE DAS SÉRIES VAZÕES MEDIDAS EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS
DO ESTADO DO CEARÁ

CRATEÚS

2026

JOSÉ MATHEUS COELHO OLIVEIRA

ANÁLISE DAS SÉRIES VAZÕES MEDIDAS EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO
ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros
Alexandre

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O47a Oliveira, José Matheus Coelho.
Análise das séries vazões medidas em estações fluviométricas do estado do Ceará / José Matheus Coelho Oliveira. – 2026.
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.
1. Vazão médias anuais. 2. Séries temporais. 3. Mann-Kendall. 4. Pettitt. 5. Açudes. I. Título.
CDD 620
-

JOSÉ MATHEUS COELHO OLIVEIRA

ANÁLISE DAS SÉRIES VAZÕES MEDIDAS EM ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DO
ESTADO DO CEARÁ

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia Civil do campus Crateús da
Universidade Federal do Ceará como
requisito parcial à obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros
Alexandre

Aprovado em: 22/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Dra. Deborah Mithya Barros Alexandre
Companhia de Gestão do Recursos Hídricos

Me. José Kerlly Soares de Araújo

Universidade Federal Do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me sustentado ao longo de toda a caminhada acadêmica, concedendo força, saúde, sabedoria e serenidade nos momentos de maior dificuldade, e por renovar diariamente a esperança de que todo esforço vale a pena.

À minha família, deixo meu reconhecimento e gratidão por estar sempre ao meu lado, oferecendo incentivo, compreensão e apoio incondicional. O suporte de vocês foi essencial para que eu não desistisse, mesmo diante das dificuldades e dos desafios enfrentados durante a graduação.

Agradeço de forma especial ao meu orientador, Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre, por todo o apoio, disponibilidade e paciência necessários durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação, atenção aos detalhes e contribuições técnicas foram fundamentais para que eu conseguisse conduzir as etapas da pesquisa com mais segurança e amadurecimento acadêmico.

Aos meus amigos Roberto, Leonardo, Cauet, Ermeson e David, agradeço por estarem comigo desde o início da faculdade, compartilhando as conquistas e também os momentos mais difíceis. A presença, a parceria e o companheirismo de vocês tornaram essa trajetória mais leve e significativa, e contribuíram diretamente para que eu chegasse até aqui.

Por fim, agradeço a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação, deixo registrado o meu muito obrigado.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu”
Eclesiastes 3:1

RESUMO

O Ceará está inserido no semiárido brasileiro, caracterizado por elevada variabilidade das chuvas, forte sazonalidade do escoamento e recorrência de secas, o que torna o conhecimento do regime hidrológico fundamental para o planejamento e a gestão de recursos hídricos; nesse cenário, a dependência histórica de reservatórios para regularização da oferta de água é um elemento central. Este trabalho analisou séries temporais de vazão média anual observadas em estações fluviométricas do Estado do Ceará, visando identificar sinais de não estacionariedade (tendências e mudanças abruptas) e discutir sua compatibilidade temporal com a presença de reservatórios a montante. Inicialmente, os dados hidrológicos foram obtidos em base oficial (HidroWeb/ANA) e submetidos a tratamento e organização em ambiente computacional, com construção de um mapa de falhas para avaliação da completude dos registros. Em seguida, foram selecionadas as estações com séries suficientemente longas e com baixa proporção de lacunas, de forma a aumentar a confiabilidade das inferências estatísticas. Para detecção de tendências monotônicas e quantificação de sua magnitude, aplicaram-se métodos não paramétricos (teste de Mann-Kendall e estimador de Sen). Para identificação de mudanças abruptas no comportamento das séries, utilizou-se o teste de Pettitt. As rotinas estatísticas foram executadas no ambiente RStudio. Paralelamente, realizou-se análise espacial em SIG (QGIS) para relacionar cada estação à sua bacia de contribuição e identificar reservatórios localizados a montante, a partir de inventário público monitorado pela COGERH. Por fim, o ano de ruptura estimado foi comparado ao ano de implantação/operação de reservatórios, adotando-se janela de tolerância de ± 5 anos, como critério de coincidência temporal sem implicar inferência causal. Os resultados subsidiam a compreensão de alterações no regime hidrológico cearense e contribuem para estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos em região semiárida.

Palavras-chave: vazão médias anuais; séries temporais; Mann-Kendall; Pettitt; açudes.

ABSTRACT

Ceará is located in Brazil's semi-arid region, characterized by high rainfall variability, strong seasonality of runoff, and recurrent droughts, which makes understanding the hydrological regime essential for water resources planning and management; in this context, the long-standing reliance on reservoirs to regulate water supply is a central element. This study analyzed annual mean streamflow time series measured at streamgauge stations in the State of Ceará (Brazil), aiming to identify signals of nonstationarity (trends and abrupt changes) and to discuss their temporal compatibility with the presence of upstream reservoirs. Initially, hydrological data were obtained from an official database (ANA HydroWeb) and processed and organized in a computational environment, including the construction of a missing-data map to assess record completeness. Next, gauge stations with sufficiently long records and a low proportion of gaps were selected to increase the reliability of statistical inferences. To detect monotonic trends and quantify their magnitude, non-parametric methods were applied (Mann-Kendall test and Sen's slope estimator). Abrupt changes in series behavior were investigated using the Pettitt change-point test. Statistical routines were implemented in R (RStudio). In parallel, spatial analysis was carried out in a GIS environment (QGIS) to relate each station to its contributing watershed and to identify reservoirs located upstream, based on a public inventory monitored by COGERH. Finally, the change-point year estimated by Pettitt was compared with the commissioning/operation year of upstream reservoirs using a ± 5 -year tolerance window as a criterion for temporal coincidence, without implying causal inference. The results support the understanding of changes in Ceará's hydrological regime and contribute to water-resources planning and management in a semi-arid region.

Keywords: average annual streamflows; time series; Mann-Kendall; Pettitt; reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização das estações fluviométricas do Ceará.....	23
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização das estações e das séries analisadas.....	28
Quadro 2 - Resultado dos testes de tendências.....	30
Quadro 3 - Classificação das estações.....	31
Quadro 4 - Síntese por Região Hidrográfica.....	35
Quadro 5 - Teste de Pettitt x Açudes.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tendência da estação de Peixe Gordo.....	33
Gráfico 2 - Tendência da estação de Jaguaribe	34
Gráfico 3 - Tendência da estação de Sitio Poço Dantas	34
Gráfico 4 - Distribuição de classes por Região Hidrográfica	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CE – Ceará

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará

GIS – Geographic Information System

GRASS – Geographic Resources Analysis Support System

H_0 – Hipótese nula

H_1 – Hipótese alternativa

IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado

MK – Mann-Kendall

MBLM – Median-Based Linear Models

QGIS – QGIS (software de Sistema de Informação Geográfica)

R – Linguagem de programação R

RH – Região Hidrográfica

SIG – Sistema de Informação Geográfica

UFC – Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Estações fluviométricas.....	18
3.2	Conceitos estatísticos	18
3.2.1	Estacionariedade e não-estacionariedade	18
3.2.2	Nível de significância	19
3.2.3	Testes utilizados	19
3.2.3.1	Teste de Mann-Kendall	19
3.2.3.2	Teste de Pettitt.....	21
3.2.3.3	Sen's slope	22
4	METODOLOGIA	23
4.1	Base de dados Hidrológicos	23
4.1.1	Séries fluviométricas	23
4.1.2	Critério de seleção	24
4.2	Análises de tendência	24
4.3	Reservatórios a montante	25
4.4	Softwares utilizados	26
4.4.1	Rstudio	27
4.4.2	QGIS	27
4.4.3	Hidro 1.4	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1	Caracterização geral das estações fluviométricas.....	28
5.2	Análise geral dos testes de tendência	29
5.3	Classificação das estações	31
5.4	Análise por Região Hidrográfica.....	35
5.5	Integração dos resultados do teste de Pettitt com os açudes a montante.....	36
6	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

APÊNDICE A – MAPA DE FALHAS.....	44
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TENDÊNCIAS DAS ESTAÇÕES	45

1 INTRODUÇÃO

O Ceará está inserido no semiárido brasileiro, região caracterizada por forte variabilidade temporal e espacial das chuvas, elevada evapotranspiração e recorrência de secas severas. A compreensão do regime hidrológico dos rios cearenses é condição básica para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, sobretudo diante dos desafios de segurança hídrica apontados para o estado (Rabelo, 2022). Nesse contexto, as redes de monitoramento hidrológico, em especial as estações fluviométricas, ocupam papel central na produção de séries históricas de nível e vazão, que constituem insumo fundamental para a outorga de direito de uso da água, a operação de reservatórios, a previsão de cheias e a avaliação da disponibilidade hídrica (Tucci, 2012).

Em razão da intermitência dos rios e da forte sazonalidade do escoamento, a garantia de abastecimento e o atendimento a usos múltiplos no Ceará dependem historicamente do armazenamento superficial por meio de reservatórios. A política de construção de açudes e barragens, iniciada ainda no final do século XIX e intensificada ao longo do século XX e início do XXI, promoveu a expansão de uma rede densa de reservatórios, composta por grandes obras estruturantes e por inúmeros pequenos açudes, que regularizam a disponibilidade hídrica entre períodos chuvosos e secos (Araújo et al., 2022; Pereira et al., 2025). Embora essa infraestrutura aumente a resiliência frente às secas, ela também modifica o regime natural de vazões a jusante, intensifica perdas por evaporação e está associada a processos de assoreamento que reduzem a capacidade de armazenamento e o rendimento hídrico ao longo do tempo (Malveira et al., 2012; Araújo et al., 2022).

O crescente debate em torno das mudanças climáticas tem ampliado o interesse por estudos que investigam tendências em diferentes componentes do ciclo hidrológico. A análise de tendências em vazões, em especial em escalas sazonais e interanuais, é fundamental para compreender a variabilidade do clima e seus impactos sobre os recursos hídricos, além de oferecer subsídios importantes para o aprimoramento de modelos hidrológicos, para a previsão de eventos hidrológicos extremos e para a gestão eficaz dos recursos hídricos (Joseph et al., 2013).

Embora haja vasta produção científica sobre precipitação no Ceará, observa-se relativa escassez de trabalhos dedicados exclusivamente à análise de vazões em múltiplas estações fluviométricas do estado. A maioria das pesquisas regionais concentra-se em dados pluviométricos, no uso e ocupação do solo ou em precipitação projetada por modelos climatológicos (Rabelo, 2022). Nesse sentido, a combinação de métodos estatísticos aplicados

às séries de vazão, visando detectar variações, falhas e possíveis mudanças de regime nas estações fluviométricas do estado, representa uma análise importante para a determinação do regime hidrológico e para a identificação de suas variabilidades naturais ou antrópicas.

Assim, a análise de tendências em séries hidrológicas de vazão assume papel central neste trabalho, pois permite verificar se as séries observadas nas estações fluviométricas do Ceará podem ser tratadas como estacionárias ou se apresentam sinais de mudança sistemática no tempo. A detecção de mudanças em registros hidrológicos é etapa essencial para distinguir a variabilidade natural de alterações associadas a mudanças climáticas e intervenções antrópicas, com implicações diretas sobre estudos de frequência, definição de vazões de projeto e avaliação de riscos hidrológicos (Kundzewicz; Robson, 2004). De acordo com Helsel et al. (2020), o uso de métodos estatísticos não paramétricos, como o teste de Mann-Kendall e Sen's Slope, é particularmente adequado para séries de recursos hídricos, que frequentemente apresentam assimetria, valores extremos e autocorrelação.

A aplicação combinada desses testes às séries de vazões médias anuais das estações fluviométricas cearenses permite, neste estudo, identificar tendências, quantificar sua magnitude, localizar possíveis pontos de ruptura e avaliar em que medida tais alterações podem estar relacionadas à construção e operação de reservatórios a montante.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Caracterizar o regime hidrológico das estações fluviométricas cearenses a partir da análise de séries temporais de vazão, com foco em variabilidades, tendências e falhas, visando apoiar a gestão de recursos hídricos, relacionando possíveis alterações com a construção de reservatórios monitorados pela COGERH.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar estações fluviométricas representativas do regime de vazões mensais de diferentes regiões do estado do Ceará.
- Analisar as tendências de mudanças nas séries de vazões médias anuais a partir de métodos não paramétricos;
- Verificar coincidências temporais entre rupturas nas séries e a construção de açudes a montante.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

As estações fluviométricas são estruturas da rede de monitoramento hidrológico onde se medem, de forma sistemática, os níveis da coluna d'água em uma seção do rio, associados a medições de descarga líquida, com o objetivo de obter séries históricas de cotas e vazões (ANA, 2016; ANA, 2024).

As séries históricas produzidas nas estações fluviométricas são insumo básico para estudos hidrológicos, dimensionamento de obras hidráulicas, operação de reservatórios, gestão de eventos críticos (secas e cheias) e planejamento de recursos hídricos em geral (ANA, 2016; Tucci, 2012). No âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional, coordenada pela ANA, esses dados sustentam a tomada de decisão em políticas públicas, contribuem para a segurança hídrica e apoiam a prevenção de desastres naturais (ANA, 2021; ANA, 2024).

3.2 CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos necessários para o entendimento do presente trabalho.

3.2.1 Estacionariedade e não-estacionariedade

O conceito de estacionariedade em séries temporais refere-se à propriedade estatística de que as características fundamentais da série como média, variância e autocorrelação permanecem constantes ao longo do tempo. Em outras palavras, uma série é dita estacionária quando seu comportamento estatístico não varia com o passar dos anos, o que facilita sua modelagem e análise preditiva (Morettin; Toloi, 2006).

A não-estacionariedade ocorre quando as propriedades estatísticas de uma série temporal como média, variância ou autocorrelação mudam ao longo do tempo, contrariando a premissa de comportamento uniforme (estacionariedade) (Sraj et al., 2018). Isso implica que a distribuição de probabilidade da variável não é constante, podendo se alterar por tendências, quebras de regime ou mudanças sazonais.

Em contextos hidrológicos, a não-estacionariedade geralmente está associada a fatores como mudanças climáticas, transformações no uso do solo, construção de barragens e

urbanização, que modificam de forma dinâmica o padrão de comportamento dos rios (Milly et al., 2008 em Prosdocimi et al., 2014).

3.2.2 Nível de significância

O nível de significância, usualmente representado pela letra grega α , indica a probabilidade de se cometer um erro tipo I em um teste estatístico, ou seja, rejeitar a hipótese nula (H_0) quando ela é, na verdade, verdadeira. Na maioria dos estudos estatísticos, adota-se convencionalmente um valor de α igual a 5% (0,05), embora, em situações que exigem maior rigor, esse valor possa ser reduzido para 1% (0,01), a fim de diminuir a chance de rejeições indevidas, o que determinará se o teste demonstrou estar dentro do nível de significância, mantendo a hipótese nula, será o P-valor. (Thiese; Ronna; Ott, 2016). Esse parâmetro é fundamental para a análise de hipóteses, sendo utilizado, por exemplo, na verificação da estacionariedade de séries temporais hidrológicas. Como observado por Martins (2022), a escolha do nível de significância influencia diretamente na interpretação dos testes estatísticos aplicados a séries históricas, como as de precipitação, onde a hipótese nula frequentemente representa a manutenção da estacionariedade.

3.2.3 Testes utilizados

Em situações em que a distribuição da variável é desconhecida, utilizam-se testes estatísticos de distribuição livre, conhecidos como testes não paramétricos. Esses testes apresentam pouca ou nenhuma exigência quanto aos parâmetros dos dados, dispensando a necessidade de normalidade e sendo mais tolerantes à presença de outliers. (Martins, 2022). São mais práticos de se usar em séries históricas hidrometeorológicas, que geralmente apresentam falhas, não apresentando as condições necessárias para a aplicação de testes paramétricos (Hipel; Mcleod, 1994).

3.2.3.1 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), de natureza não paramétrica, é amplamente utilizado para identificar tendências monotônicas em séries temporais, sem a necessidade de assumir que tais tendências sejam lineares. (Santos; Portela; Santos, 2007). Originalmente proposto por Mann (1945) e posteriormente aprimorado por Kendall (1975), o teste tem apresentado resultados consistentes em diversas aplicações.

Primeiramente são aplicados os testes de sequências:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (1)$$

Em que:

$$\text{Sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

X_i e X_j = valores da série, com $j > i$

n = comprimento da série

Após a aplicação do teste de sequências, calcula-se a variância amostral associada ao número de sequências observadas. Com base nesse valor (V_s) e no número total de sequências obtido, é possível calcular a estatística padronizada Z , a qual indica a presença de tendência na série analisada. A interpretação da estatística Z permite identificar se há tendência crescente (positiva), decrescente (negativa) ou ausência de tendência significativa (nula). As equações utilizadas para o cálculo da variância V_s e da estatística Z são apresentadas a seguir:

$$V_s = \frac{(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m i(i-1)(2i+5))}{18} \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} (s - 1/\sqrt{V_s}), & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ (s + 1/\sqrt{V_s}), & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

i = valores em grupos empatados

n = tamanho amostral

\sum = Somatório dos conjuntos de dados empatados

M = quantidade de grupos empatados

Após o cálculo da estatística do teste, procede-se à análise do seu valor de probabilidade (P-valor), o qual é determinado por meio da aplicação da função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão, sendo expressa matematicamente da seguinte forma:

$$p = 0,5 - \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_0^{|z|} e^{-t^2/2} dt \right) \quad (4)$$

Em que:

t = Valores normalizados da amostra.

3.2.3.2 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt (Pettitt, 1979) é uma ferramenta estatística não paramétrica utilizada para identificar a presença de pontos de mudança em uma série temporal. Esse teste avalia a homogeneidade dos dados ao longo do tempo, considerando como hipótese nula (H_0) a inexistência de alterações significativas na série, enquanto a hipótese alternativa (H_1) propõe a ocorrência de uma mudança abrupta nos valores observados. A detecção desse ponto de ruptura é interpretada como um indício de não estacionariedade na série. A partir das equações:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (5)$$

$$\text{sgn} = (x) \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K(t) = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (7)$$

Em que:

x_t e x_j = as duas subamostras analisadas, com $j > i$

N = tamanho amostral

Primeiro, calculam-se as estatísticas do teste ($U_{t,N}$) para todos os instantes t . Em seguida, identifica-se o maior valor absoluto, que define a estatística $k(t)$ e indica o ponto de

mudança mais significativo da série. Por fim, avalia-se a significância dessa mudança por meio do cálculo do p-valor, pela equação. (Martins, 2022).

$$P = 2 * e^{\left\{ \frac{-6(K_t)^2}{(N^3 + N^2)} \right\}} \quad (8)$$

3.2.3.3 Sen's slope

O teste de Sen, também conhecido como estimador da inclinação de Sen (*Sen's slope estimator*), é um método não paramétrico utilizado para a detectar o viés da declividade na curva de tendências lineare, sendo amplamente empregado em conjunto com o teste de Mann-Kendall em estudos hidrológicos (Sen, 1968; Helsel et al., 2020; Santos et al., 2020). Nesse procedimento, calcula-se a inclinação entre todos os pares possíveis de observações de uma série temporal x_t , considerando os instantes i e j ($j > i$), por meio da expressão:

$$Q_{ij} = \frac{X_j - X_i}{j - i}, \quad \text{em que } j > i \quad (9)$$

Em seguida, o estimador de Sen (Q) é definido como a mediana de todos os valores Q_{ij} calculados:

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(M+1)/2]}, & \text{se } M \text{ for par} \\ \frac{Q_{[M/2]} + Q_{[(M+2)/2]}}{2}, & \text{se } M \text{ for ímpar} \end{cases} \quad (10)$$

Em que:

N = tamanho amostral

M = número de pares comparados

X_j e X_i = valores das subamostras

4 METODOLOGIA

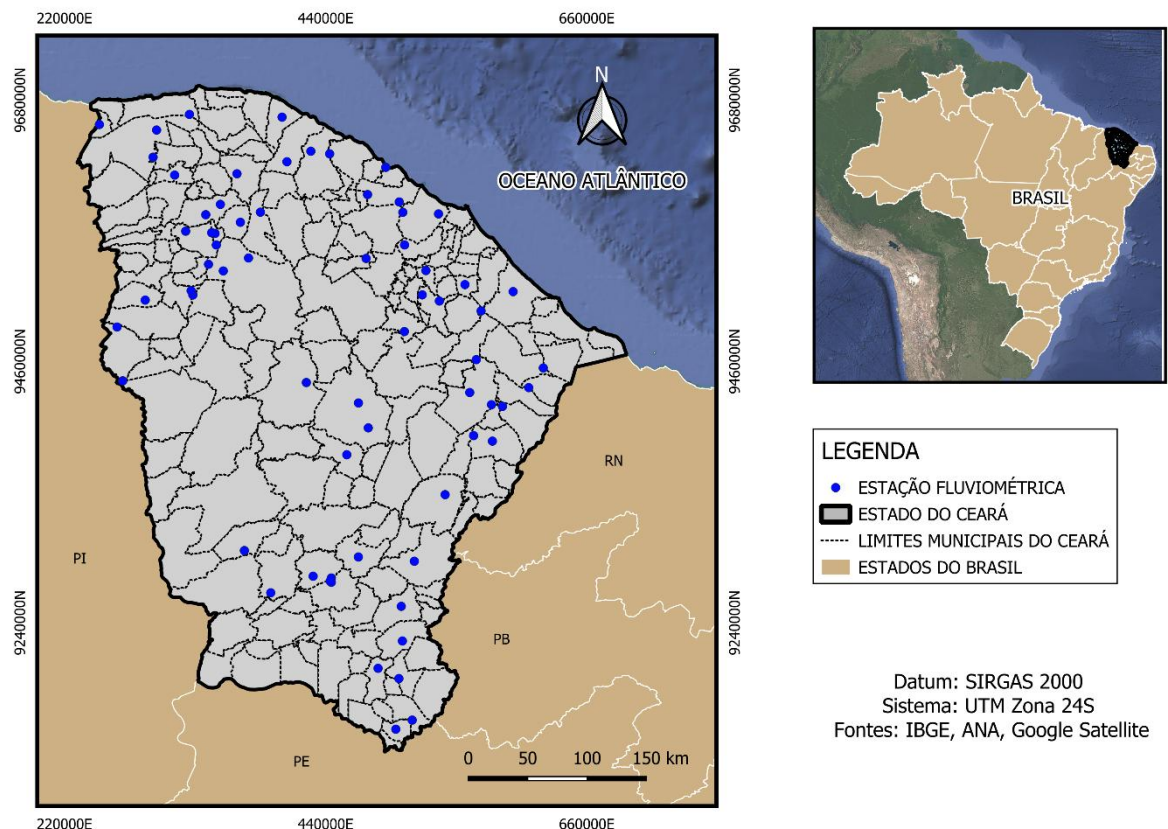
Este capítulo apresenta, de forma detalhada, os procedimentos metodológicos adotados para a análise no regime hidrológico a partir de séries históricas de vazão no Estado do Ceará. O principal do estudo está na identificação de sinais de mudança ao longo do tempo (tendências) e de mudanças abruptas (rupturas estruturais) nas vazões médias anuais observadas em estações fluviométricas selecionadas, bem como na investigação da possível associação desses sinais com a presença de reservatórios localizados a montante.

4.1 BASE DE DADOS HIDROLÓGICOS

4.1.1 Séries fluviométricas

Foram utilizadas séries históricas de vazão obtidas em bases oficiais de monitoramento hidrológico das 67 estações fluviométricas do Estado do Ceará, como mostrado na figura 1. A principal fonte consultada foi o Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (HidroWeb/ANA).

Figura 1 - Mapa de localização das estações fluviométricas do Ceará



Fonte: Autor (2026)

A variável hidrológica analisada para os testes de tendência foi a vazão média anual, expressa em metros cúbicos por segundo (m^3/s). Essa variável foi escolhida por resumir o comportamento do escoamento ao longo de cada ano, permitindo comparações entre estações com diferentes regimes de intermitência.

As informações foram importadas para o software Hidro 1.4, onde se realizou o processamento inicial, e posteriormente exportadas para planilhas no Excel para a construção do mapa de falhas. O mapa de falhas, que está no Apêndice A, é a representação matricial da disponibilidade temporal de dados mensais de vazão de cada estação, teve como principal objetivo identificar períodos de forte descontinuidade ou lacunas extensas nas séries, auxiliar na seleção de estações com registros suficientemente longos e contínuos para aplicação de testes estatísticos de tendência e mudança.

4.1.2 Critério de seleção

A partir da análise do mapa de falhas das 67 estações do Estado, a seleção das estações fluviométricas foi realizada em critérios mínimos de extensão e completude das séries, visando aumentar a confiabilidade das análises e reduzir vieses associados a registros curtos ou excessivamente fragmentados. Foram incluídas apenas as estações que atenderam simultaneamente aos seguintes requisitos:

- a) duração mínima da série histórica igual ou superior a 30 anos;
- b) percentual de falhas inferior a 10%, em relação ao total mensal.

A exigência de séries com pelo menos 30 anos busca garantir que as estatísticas representem adequadamente a variabilidade típica do semiárido, reduzindo a influência de ciclos curtos e de períodos hidrológicos atípicos. O limite de falhas inferior a 10% foi adotado para minimizar incertezas decorrentes de lacunas que poderiam comprometer a interpretação dos testes, especialmente aqueles voltados à detecção de mudanças estruturais. Após a aplicação desses critérios ao conjunto inicial de 67 estações, a amostra foi reduzida a 24 estações fluviométricas que passaram a compor o conjunto de análise principal.

4.2 ANÁLISES DE TENDÊNCIA

Para a análise de tendência nas séries temporais selecionadas, foram empregados os testes de Mann-Kendall e Sen's Slope, que avaliaram a sequência dos valores das séries, definindo os níveis de tendência e o sentido de suas declividades e teste Pettitt, foi utilizado

para identificar pontos de mudança (break points) na série, ou seja, momentos em que há alteração significativa no comportamento da variável analisada, sendo útil para detectar rupturas na homogeneidade temporal.

Os valores de vazão média anual das séries temporais das 24 estações selecionadas foram tratados estatisticamente por meio da linguagem de programação R, no ambiente RStudio. Para isso, utilizaram-se pacotes específicos de análise de séries temporais e de testes não paramétricos, os quais já implementam as rotinas consolidadas para aplicação dos testes de Mann-Kendall, Pettitt e Sen's Slope. Esses pacotes automatizam o cálculo das estatísticas de teste, valores-p e parâmetros associados, reduzindo a possibilidade de erros manuais e garantindo a reprodutibilidade das análises realizadas.

Os resultados dos testes estatísticos foram utilizados para classificar as 24 estações fluviométricas em três categorias de alteração hidrológica.

Assim, as séries foram enquadradas nas seguintes classes, onde significativo ($p < 0,05$):

- a) Fortemente alterada: Mann-Kendall significativo e Pettitt significativo;
- b) Alterada: Mann-Kendall significativo ou Pettitt significativo;
- c) Natural/Estável: Mann-Kendall não significativo e Pettitt não significativo.

A classe Fortemente alterada representa situações em que há evidência estatística de tendência e de mudança abrupta, sugerindo modificação persistente do regime. A classe Alterada reúne séries com apenas um dos sinais estatísticos (tendência ou ruptura), o que pode refletir alterações graduais sem ponto de mudança nítido, ou mudanças abruptas sem tendência monotônica no período total. Por fim, a classe Natural/Estável corresponde a séries sem evidências estatísticas de alteração, dentro do nível de significância adotado.

4.3 RESERVATÓRIOS A MONTANTE

Para caracterizar o contexto hídrica associado às estações fluviométricas, foi elaborado um inventário de reservatórios localizados a montante de cada uma. Foram considerados todos os reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - COGERH.

A delimitação dos açudes associados a cada estação foi realizada por meio de análise espacial em ambiente SIG, utilizando o software QGIS. Inicialmente, foi feito o download do arquivo vetorial dos açudes disponibilizado no Atlas da COGERH, o qual contém a localização e o contorno dos reservatórios. Em seguida, esse arquivo foi inserido no projeto

do QGIS juntamente com o arquivo vetorial das bacias de contribuição correspondentes às estações analisadas, ambos no mesmo sistema de referência cartográfica adotado no estudo, de modo a evitar incompatibilidades espaciais.

Com as duas camadas (bacias de contribuição das estações e açudes) carregadas no QGIS, procedeu-se à etapa de identificação dos açudes associados a cada estação. Essa identificação foi feita visualmente, verificando-se quais polígonos de açudes se encontravam totalmente contidos ou predominantemente situados dentro dos limites da bacia de contribuição de cada estação. Assim, para cada bacia de contribuição, eram selecionados os açudes que se localizavam em seu interior, estabelecendo a correspondência “açude x estação”.

A integração entre as estatísticas das séries de vazão e o contexto de reservatórios a montante buscou investigar se sinais de alteração hidrológica (tendências e rupturas) apresentam compatibilidade temporal e associação com o grau de regularização

O ano de ruptura identificado pelo teste de Pettitt foi comparado ao ano de entrada em operação do principal reservatório a montante. Para operacionalizar a avaliação de coincidência temporal, adotou-se como critério a janela de tolerância de 5 anos. Essa janela de ± 5 anos foi empregada para acomodar possíveis defasagens entre o início de operação e a manifestação estatística de mudanças na vazão, as quais podem ocorrer de forma gradual devido ao período de enchimento do reservatório, ajustes operacionais e variabilidade climática. Assim, coincidências dentro da janela foram interpretadas como indício de compatibilidade temporal, sem implicar comprovação causal.

4.4 SOFTWARES UTILIZADOS

A escolha adequada dos softwares empregados ao longo deste trabalho é fundamental para garantir a confiabilidade das análises, a precisão dos cálculos e a organização dos dados. Cada ferramenta utilizada desempenhou um papel específico no processamento das informações, no desenvolvimento das análises estatísticas e na elaboração dos produtos finais, contribuindo para a robustez metodológica da pesquisa. Assim, nesta seção, apresenta-se uma descrição sucinta dos principais softwares adotados, destacando suas funcionalidades, justificativas de uso e relevância para o desenvolvimento do estudo.

4.4.1 Rstudio

O RStudio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) projetado especificamente para facilitar o uso da linguagem R. Ele oferece uma interface intuitiva composta por painéis organizados para visualização de scripts, gráficos, console, arquivos e pacotes, o que torna o processo de programação mais eficiente e acessível. Foram utilizados os seguintes *packages*: Median-Based Linear Models (MBLM) e Trend, com função de análise de séries temporais, detecção de tendências e análise de homogeneidade.

4.4.2 QGIS

O QGIS tornou-se uma das principais plataformas para visualização, edição, análise e processamento de informações geospaciais, neste estudo, o uso do software foi limitado à análise da localização das estações e dos açudes a montante, que auxiliou na verificação e escolha tanto dos reservatórios quanto das estações, assim como na criação dos mapas utilizados.

4.4.3 Hidro 1.4

O software Hidro 1.4, disponibilizado no portal Hidroweb, foi utilizado como ferramenta de apoio no tratamento das séries históricas. Após o download dos dados brutos das estações, os arquivos foram importados no Hidro 1.4, onde as séries foram organizadas e padronizadas. Em seguida, o programa foi utilizado para exportar essas informações em formato compatível com planilhas eletrônicas, permitindo a transferência dos dados para o Microsoft Excel, onde foram realizadas as etapas posteriores de análise e processamento estatístico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Após a aplicação dos critérios de seleção (séries com duração mínima de 30 anos e percentual de falhas inferior a 10%), foram analisadas 24 estações fluviométricas, distribuídas em 9 Regiões Hidrográficas do Estado do Ceará. As séries possuem extensão temporal elevada, com duração média de 48,6 anos (mediana de 51 anos), variando entre 37 e 62 anos. O período total representado no conjunto de dados abrange de 1962 a 2023, o que permite avaliar mudanças de longo prazo com maior robustez estatística e menor influência de flutuações de curto prazo, conforme mostrado no quadro 1.

Quadro 1 - Caracterização das estações e das séries analisadas

Estação	Código	Região Hidrográfica	Período	Nº de anos observados
Ararius	35263000	Acaraú	1984-2020	37
Arneiroz	36020000	Alto Jaguaribe	1973-2023	51
Barra Nova	35740000	Metropolitana	1984-2023	40
Caio Prado	35830000	Metropolitana	1984-2023	40
Carius	36130000	Alto Jaguaribe	1984-2023	40
Croatá	34730000	Serra da Ibiapaba	1962-2023	62
Fazenda Parana	35258000	Acaraú	1984-2023	40
Granja	35170000	Coreaú	1971-2023	53
Groairas	35260000	Acaraú	1973-2023	51
Ico	36290000	Salgado	1973-2023	51
Iguatu	36160000	Alto Jaguaribe	1973-2023	51
Jaguaribe	36320000	Médio Jaguaribe	1977-2023	47
Malhada	36045000	Alto Jaguaribe	1979-2023	45
Morada Nova II	36580000	Banabuiú	1973-2023	51
Peixe Gordo	36390000	Médio Jaguaribe	1973-2023	51
Podimirim	36250000	Salgado	1973-2023	51
Quixeramobim	36520000	Banabuiú	1973-2023	51
Senador Pompeu	36470000	Banabuiú	1973-2023	51
Sítio Lapinha	36210000	Salgado	1965-2023	59
Sítio Poço Dantas	36125000	Alto Jaguaribe	1973-2023	51
Sobral	35275000	Acaraú	1973-2023	51
São Luis do Curu	35570000	Curu	1973-2023	51
Umarituba Nova	35668000	Metropolitana	1984-2023	40
Várzea do Grosso	35235000	Acaraú	1973-2023	51

Fonte: Autor (2026).

5.2 ANÁLISE GERAL DOS TESTES DE TENDÊNCIA

Inicialmente, será realizada uma análise geral dos resultados dos testes de tendência apresentados no Quadro 2. Nessa etapa, será feita uma avaliação conjunta dos valores de p do teste de Mann-Kendall, dos coeficientes de Sen e dos pontos de mudança identificados pelo teste de Pettitt, bem como das classes atribuídas a cada estação. Essa análise permitirá uma visão preliminar do grau de alteração das séries de vazão ao longo das diferentes regiões hidrográficas, servindo de base para discussões mais detalhadas em seções posteriores.

O teste de Mann-Kendall (nível de significância de 5%) foi aplicado às séries anuais para investigar a presença de tendências monotônicas no período analisado. A hipótese nula do teste indica ausência de tendência (estacionariedade), enquanto a hipótese alternativa indica a existência de tendência crescente ou decrescente ao longo do tempo. Do total de 24 estações analisadas, 17 apresentaram tendência estatisticamente significativa ($p < 0,05$), correspondendo a 70,8% da amostra. A direção predominante das tendências foi negativa: 95,8% das séries apresentaram estatística tau (τ) menor que zero, indicando redução progressiva da vazão média anual ao longo das décadas.

A significância estatística por si só não descreve a relevância hidrológica das mudanças observadas. Por essa razão, estimou-se a magnitude das tendências por meio do estimador de Sen, expresso em $m^3/s/ano$, o qual representa a inclinação mediana entre pares de observações ao longo do tempo e é amplamente utilizado em séries hidrológicas por sua robustez a valores extremos. No conjunto de estações, o Sen's slope apresentou mediana de $-0.090 m^3/s/ano$ e média de $-0.233 m^3/s/ano$, com valores variando de $-1,801$ a $0,012 m^3/s/ano$. A assimetria entre média e mediana indica a presença de alguns postos com declínios muito intensos, que influenciam o valor médio.

Já no teste de Pettitt, no conjunto analisado, 14 estações apresentaram rupturas significativas ($p < 0,05$), o que corresponde a 58.3% do total. Os anos de mudança estimados variaram de 1989 a 2011. Observou-se concentração de rupturas em dois intervalos principais: (i) final da década de 1980 e início da década de 1990 (1989-1991), com 6 ocorrências; e (ii) período 2009-2011, com 10 ocorrências. Essas concentrações temporais sugerem que, além de alterações graduais captadas por Mann-Kendall e Sen, houve episódios de mudança mais abrupta no comportamento das vazões anuais, possivelmente associados a alterações estruturais no sistema hidrológico e/ou no contexto de uso da água em escala regional.

Quadro 2 - Resultado dos testes de tendências

Estação	Código	Mann-Kendall				Sen's Slope			Pettitt			
		τ	Z	mk_p	mk_sig	sen_slope	sen_low	sen_high	pettitt_cp_ano	pettitt_stat	pettitt_p	pettitt_sig
Ararius	35263000	-0,48885	-4,04752	0,00005	VERDADEIRO	-0,23160	-0,24665	-0,17290	2009	237	0,00048	VERDADEIRO
Ameiroz	36020000	-0,26815	-2,61376	0,00896	VERDADEIRO	-0,03588	-0,06649	-0,02721	1990	311	0,00585	VERDADEIRO
Barra Nova	35740000	-0,34603	-2,95573	0,00312	VERDADEIRO	-0,07626	-0,08668	-0,04754	2005	219	0,00495	VERDADEIRO
Caio Prado	35830000	-0,33468	-2,67571	0,00746	VERDADEIRO	-0,06041	-0,11751	-0,04110	2009	173	0,00984	VERDADEIRO
Cariús	36130000	-0,12626	-1,05112	0,29320	FALSO	-0,08103	-0,23711	-0,02689	2011	81	0,81914	FALSO
Croatá	34730000	-0,27426	-2,94753	0,00320	VERDADEIRO	-0,03239	-0,06131	-0,02262	2011	426	0,00323	VERDADEIRO
Fazenda Paraná	35258000	-0,10969	-0,94176	0,34632	FALSO	-0,01189	-0,04776	0,00169	2011	129	0,29342	FALSO
Granja	35170000	-0,17269	-1,74127	0,08164	FALSO	-0,25108	-0,45288	-0,13115	2001	211	0,21611	FALSO
Groaíras	35260000	-0,14693	-1,42976	0,15279	FALSO	-0,02720	-0,06381	-0,00885	1989	175	0,31522	FALSO
Ico	36290000	-0,22794	-2,32559	0,02004	VERDADEIRO	-0,36168	-0,47357	-0,20457	1989	267	0,06983	FALSO
Iguatu	36160000	-0,18325	-1,80666	0,07082	FALSO	-0,26800	-0,36640	-0,14338	1990	224	0,11693	FALSO
Jaguaribe	36320000	-0,26983	-2,63238	0,00848	VERDADEIRO	-0,75333	-0,93442	-0,40633	2011	242	0,05842	FALSO
Malhada	36045000	-0,41430	-3,70164	0,00021	VERDADEIRO	-0,02271	-0,05319	-0,02036	2008	248	0,00464	VERDADEIRO
Morada Nova II	36580000	-0,51232	-5,00888	5,47E-07	VERDADEIRO	-0,31547	-0,42409	-0,26645	1999	375	0,00041	VERDADEIRO
Peixe Gordo	36390000	-0,51450	-5,26168	1,43E-07	VERDADEIRO	-1,80092	-2,12638	-1,40121	1997	447	0,00017	VERDADEIRO
Podimirim	36250000	-0,24755	-2,49985	0,01243	VERDADEIRO	-0,05500	-0,07916	-0,03244	1989	247	0,09480	FALSO
Quixeramobim	36520000	-0,41463	-3,85811	0,00011	VERDADEIRO	-0,12843	-0,22910	-0,09635	2011	290	0,00258	VERDADEIRO
Senador Pompeu	36470000	-0,35816	-3,58188	0,00034	VERDADEIRO	-0,16168	-0,19543	-0,10493	2011	336	0,00496	VERDADEIRO
Sítio Lapinha	36210000	-0,12288	-1,35507	0,17539	FALSO	-0,02862	-0,03895	-0,00752	2009	266	0,23555	FALSO
Sítio Poço Dantas	36125000	0,02332	0,206027	0,83677	FALSO	0,01152	-0,01775	0,03432	2011	108	0,79494	FALSO
Sobral	35275000	-0,29459	-2,94217	0,00326	VERDADEIRO	-0,60350	-0,79921	-0,43599	2004	299	0,01728	VERDADEIRO
São Luís do Curu	35570000	-0,40537	-4,00766	0,00006	VERDADEIRO	-0,18037	-0,25768	-0,15692	1996	342	0,00267	VERDADEIRO
Umarituba Nova	35668000	-0,42654	-3,47117	0,00052	VERDADEIRO	-0,01777	-0,07601	-0,01277	1998	176	0,01321	VERDADEIRO
Várzea do Grosso	35235000	-0,30612	-3,09452	0,00197	VERDADEIRO	-0,09897	-0,15757	-0,08428	1991	294	0,02660	VERDADEIRO

Fonte: Autor (2026)

Em que:

τ (tau) = coeficiente tau de Mann-Kendall;

Z = estatística do teste de Mann-Kendall;

mk_p = p-valor (MK);

mk_sig = significância do MK (VERDADEIRO se $p < 0,05$).

sen_slope = inclinação de Sen ($m^3/s/ano$);

sen_low/sen_high = limites inferior/superior do intervalo de confiança da inclinação.

pettitt_cp_ano = ano do ponto de mudança;

pettitt_stat = estatística de Pettitt;

pettitt_p = p-valor (Pettitt);

pettitt_sig = significância (VERDADEIRO se $p < 0,05$).

5.3 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTAÇÕES

Com base na combinação entre tendência (Mann-Kendall) e ruptura (Pettitt), as estações foram classificadas em três categorias de alteração hidrológica: Natural/Estável (sem tendência e sem ruptura significativas), Alterada (tendência ou ruptura significativa) e Fortemente alterada (tendência e ruptura significativas).

Do total de 24 estações, 14 (58,3%) foram classificadas como Fortemente alteradas, 3 (12,5%) como Alteradas e 7 (29,2%) como Naturais/Estáveis, como mostrado no Quadro 3. A predominância das classes Alterada e Fortemente alterada indica que grande parte da rede fluviométrica analisada apresenta sinais estatísticos consistentes de modificação do regime de vazões anuais.

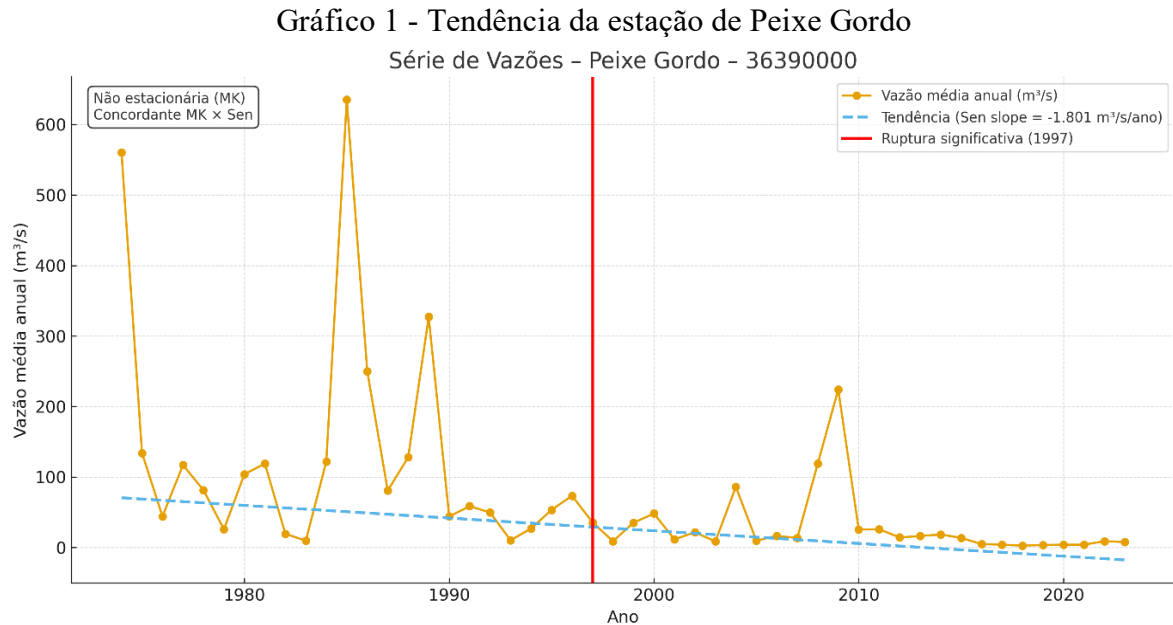
Quadro 3 - Classificação das estações

Estação	Classe	RH	MK (p)	Sen ($m^3/s/ano$)	Pettitt t0	Pettitt (p)
Ararius	Fortemente alterado	Acaraú	0,00005	-0,23160	2009	0,00048
Sobral	Fortemente alterado	Acaraú	0,00326	-0,60350	2004	0,01728
Várzea do Grosso	Fortemente alterado	Acaraú	0,00197	-0,09897	1991	0,02660
Arneiroz	Fortemente alterado	Alto Jaguaribe	0,00896	-0,03588	1990	0,00585
Malhada	Fortemente alterado	Alto Jaguaribe	0,00021	-0,02271	2008	0,00464

Estação	Classe	RH	MK (p)	Sen (m³/s/ano)	Pettitt t0	Pettitt (p)
Morada Nova II	Fortemente alterado	Banabuiú	5,47E-07	-0,31547	1999	0,00041
Quixeramobim	Fortemente alterado	Banabuiú	0,00011	-0,12843	2011	0,00258
Senador Pompeu	Fortemente alterado	Banabuiú	0,00034	-0,16168	2011	0,00496
São Luis do Curu	Fortemente alterado	Curu	0,00006	-0,18037	1996	0,00267
Barra Nova	Fortemente alterado	Metropolitana	0,00312	-0,07626	2005	0,00495
Caio Prado	Fortemente alterado	Metropolitana	0,00746	-0,06041	2009	0,00984
Umarituba Nova	Fortemente alterado	Metropolitana	0,00052	-0,01777	1998	0,01321
Peixe Gordo	Fortemente alterado	Médio Jaguaribe	1,43E-07	-1,80092	1997	0,00017
Croatá	Fortemente alterado	Serra da Ibiapaba	0,00320	-0,03239	2011	0,00323
Jaguaribe	Alterado	Médio Jaguaribe	0,00848	-0,75333	2011	0,05842
Ico	Alterado	Salgado	0,02004	-0,36168	1989	0,06983
Podimirim	Alterado	Salgado	0,01243	-0,05500	1989	0,09480
Fazenda Parana	Natural/ Estável	Acaraú	0,34632	-0,01189	2011	0,29342
Groairas	Natural/ Estável	Acaraú	0,15279	-0,02720	1989	0,31522
Carius	Natural/ Estável	Alto Jaguaribe	0,29320	-0,08103	2011	0,81914
Iguatu	Natural/ Estável	Alto Jaguaribe	0,07082	-0,26800	1990	0,11693
Sítio Poço Dantas	Natural/ Estável	Alto Jaguaribe	0,83677	0,01152	2011	0,79494
Granja	Natural/ Estável	Coreaú	0,08164	-0,25108	2001	0,21611
Sítio Lapinha	Natural/ Estável	Salgado	0,17539	-0,02862	2009	0,23555

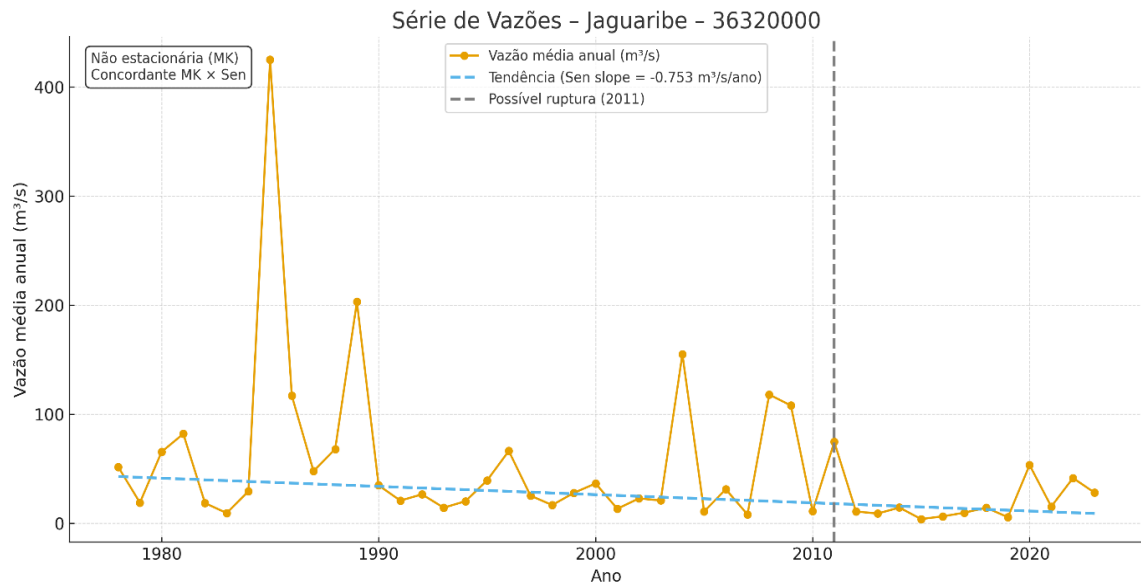
Fonte: Autor (2026)

O posto Peixe Gordo (código 36390000), exemplo de fortemente alterado, localizado na RH Médio Jaguaribe, apresentou tendência negativa altamente significativa (Mann-Kendall: $p = 0,000000143$; $\tau = -0,51$) e a maior magnitude de declínio dentre as séries analisadas (Sen's slope = $-1,801 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$). O teste de Pettitt indicou ruptura significativa em 1997 ($p = 0,000165$), como mostrado no Gráfico 1.



Já o posto Jaguaribe (código 36320000), classificado como alterado, na RH Médio Jaguaribe, que apresentou tendência negativa significativa ($p = 0,0085$) e elevada magnitude de declínio (Sen's slope = $-0,753 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$). O teste de Pettitt indicou um ponto de mudança em 2011, com $p = 0,0584$, ligeiramente acima do limiar de 5%, apresentou tendência significativa (Mann-Kendall), porém sem ruptura significativa pelo teste de Pettitt, como mostrado no Gráfico 2.

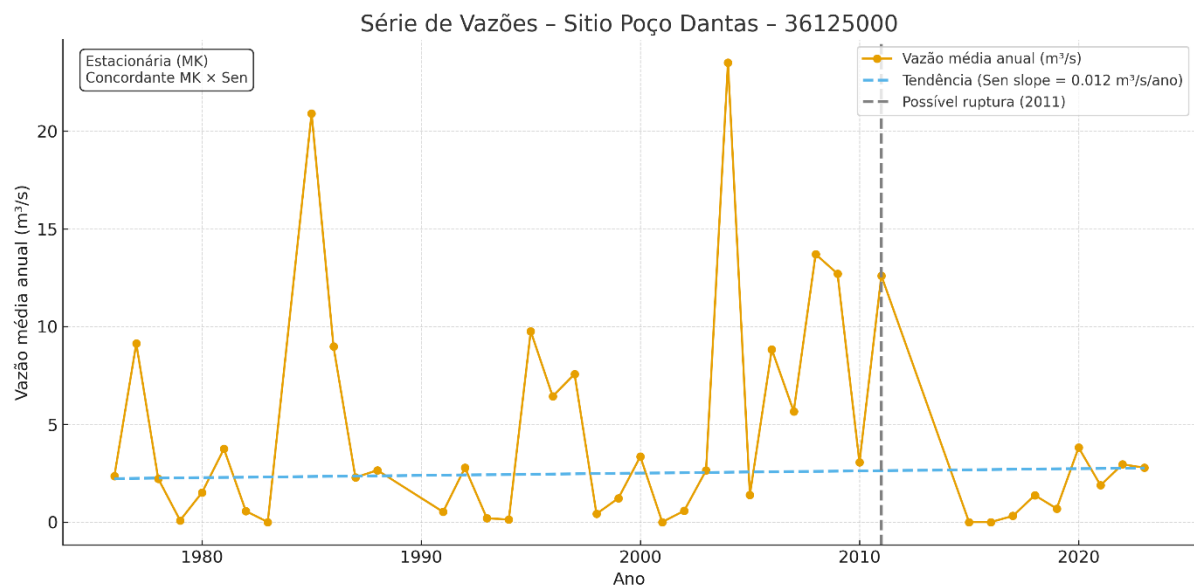
Gráfico 2 - Tendência da estação de Jaguaribe



Fonte: Autor (2026)

Já na estação Sítio Poço Dantas (código 36125000), na RH Alto Jaguaribe, que apresentou inclinação ligeiramente positiva (Sen's slope = 0,012 m³/s/ano) e ausência de significância estatística (MK: $p=0,8368$; Pettitt: $p=0,7949$), classificada como Natural/Estável não se identificou tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall nem ruptura significativa pelo teste de Pettitt, como mostrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Tendência da estação de Sítio Poço Dantas



Fonte: Autor (2026)

5.4 ANÁLISE POR REGIÃO HIDROGRÁFICA

O conjunto dos resultados por Região Hidrográfica evidencia contrastes importantes no Estado, como mostrado no Quadro 4. Regiões com maior densidade de açudes e maior histórico de regularização tendem a concentrar séries com tendências negativas e classes de maior alteração, enquanto regiões com menor influência de reservatórios, com regime mais estável tendem a apresentar maior proporção de séries Naturais/Estáveis.

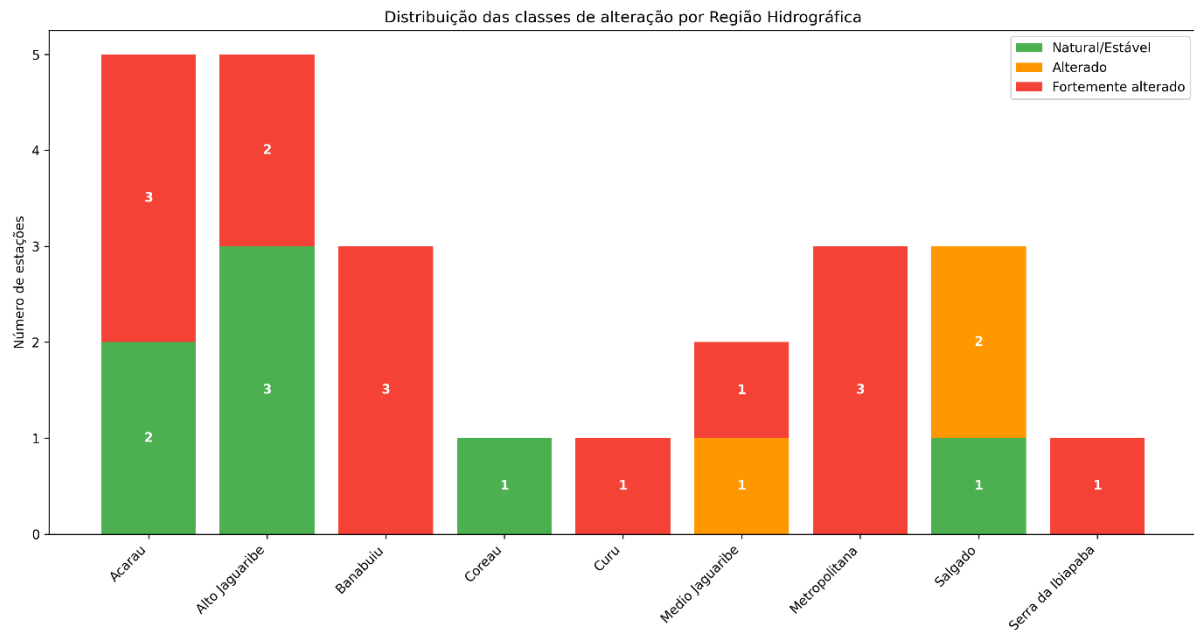
Quadro 4 - Síntese por Região Hidrográfica

RH	Qtd de estações	MK sig. (%)	Pettitt sig. (%)	Sen's Slope Média	Fortemente alterado	Natural/Estável
Acaraú	5	60,0	60,0	-0,099	3	2
Alto Jaguaribe	5	40,0	40,0	-0,036	2	3
Banabuiú	3	100,0	100,0	-0,162	3	0
Metropolitana	3	100,0	100,0	-0,060	3	0
Salgado	3	66,7	0,0	-0,055	0	1
Médio Jaguaribe	2	100,0	50,0	-1,277	1	0
Coreaú	1	0,0	0,0	-0,251	0	1
Curu	1	100,0	100,0	-0,180	1	0
Serra da Ibiapaba	1	100,0	100,0	-0,032	1	0

Fonte: Autor (2026)

Destaca-se a RH Médio Jaguaribe, que apresentou as maiores magnitudes negativas de Sen, refletindo declínios expressivos. Na RH Banabuiú e na RH Metropolitana, todas as séries analisadas apresentaram tendência e ruptura significativas, resultando em 100% de classificação como Fortemente alterada. Em contraste, a RH Alto Jaguaribe concentrou a maior proporção de séries Naturais/Estáveis, o que pode refletir diferenças de regime hidrológico, localização das estações e grau de intervenção a montante. A RH Coreaú, representada por um posto na amostra, apresentou comportamento classificado como Natural/Estável, embora com inclinação negativa moderada, indicando que a ausência de significância não elimina a possibilidade de mudanças, mas sugere menor evidência estatística de alteração sistemática no período, como mostrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Distribuição de classes por Região Hidrográfica



Fonte: Autor (2026)

5.5 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS DO TESTE DE PETTITT COM OS AÇUDES A MONTANTE

Foi comparado o ano de ruptura estimado pelo teste de Pettitt (t_0) nas 14 estações na qual foi significativo, com o ano de construção dos açudes a montante, adotando-se como critério de coincidência temporal uma janela de ± 5 anos, como mostrado no quadro 5.

Considerando a coincidência com pelo menos um açude a montante (critério ± 5 anos), 9 das 14 estações apresentaram compatibilidade temporal, ou seja 64,3%. Ressalta-se que, para a estação Croatá, não foi identificado açude a montante, ao excluir esse caso, a compatibilidade passa a 69,2%. Quando a comparação é realizada apenas com o açude principal (maior capacidade), a compatibilidade ocorre em 3 estações (Ararius, Umarituba Nova e Peixe Gordo), equivalendo a 21,4% ou 23,1 ao desconsiderar Croatá. Esses resultados indicam que, em diversos casos, a ruptura pode estar associada a açudes secundários ou a um conjunto de intervenções distribuídas ao longo da bacia, e não necessariamente ao maior reservatório; ainda assim, trata-se de uma análise de compatibilidade temporal, sem inferência causal estrita.

Quadro 5 - Teste de Pettitt x Açudes

Estação	RH	t0 (ano)	Pettitt (p)	Açudes (±5 anos)	Açude principal (ano)
Ararius	Acaraú	2009	0,00048	Taquara (2010)	Taquara (2010)
Sobral	Acaraú	2004	0,01728	Carmina (2003)	Araras (1958)
Várzea do Grosso	Acaraú	1991	0,02660	-	Araras (1958)
Arneiroz	Alto Jaguaribe	1990	0,00585	Favelas (1988); Parambu (1992); Forquilha II (1988); Trici (1987)	Arneiroz II (2004)
Malhada	Alto Jaguaribe	2008	0,00464	Mamoeiro (2013)	Orós (1962)
Morada Nova II	Banabuiú	1999	0,00041	Pirabibu (2000); Mons.Tabosa (1998); Fogareiro (1996); Serafim Dias (1995)	Banabuiú (1966)
Quixeramobim	Banabuiú	2011	0,00258	Umari (2011)	Fogareiro (1996)
Senador Pompeu	Banabuiú	2011	0,00496	-	Banabuiú (1966)
São Luis do Curu	Curu	1996	0,00267	Jerimum (1996)	Pentecoste (1957)
Barra Nova	Metropolitana	2005	0,00495	-	Acarape do Meio (1924)
Caio Prado	Metropolitana	2009	0,00984	-	Pacajus (1993)
Umarituba Nova	Metropolitana	1998	0,01321	Sítios Novos (1999)	Sítios Novos (1999)
Peixe Gordo	Médio Jaguaribe	1997	0,00017	Potiretama (1992); Canafistula (1992); Caldeirões (1992); Tigre (1992); Trussu (1996); Olho D'água (1998); Tatajuba (1996); Valério (1996); Cachoeira (1999); Madeiro (1999); Canoas (1999); Benguê (2000); Castanhão (2002).	Castanhão (2002)
Croatá	Serra da Ibiapaba	2011	0,00323	-	-

Fonte: Autor (2026)

Na estação de Peixe Gordo a associação com o inventário de açudes evidencia elevada regularização a montante com destaque para o açude Castanhão (2002) como principal reservatório. Observa-se, entretanto, que a ruptura estimada (1997) coincide mais diretamente com a implantação de açudes secundários no entorno do período (Potiretama (1992); Canafistula (1992); Caldeirões (1992); Tigre (1992); Trussu (1996); Olho D'água (1998); Tatajuba (1996); Valério (1996); Cachoeira (1999); Madeiro (1999); Canoas (1999); Benguê (2000).), sugerindo que a mudança abrupta pode estar associada ao conjunto de intervenções anteriores à consolidação do sistema, enquanto o grande reservatório pode contribuir para intensificar e manter o declínio de longo prazo evidenciado pelo teste de Sen's Slope.

Já na estação de Ararius, a ruptura apresentou coincidência direta com a construção do açude Taquara (2010), indicado como principal a montante, o que fortalece a interpretação de que a implantação do reservatório pode ter alterado o padrão de vazões observado no posto, ao menos em termos de mudança abrupta de nível.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho estabeleceu como objetivo geral caracterizar o regime hidrológico das estações fluviométricas do Estado do Ceará por meio da análise de séries temporais de vazão, com ênfase na identificação de variabilidades, tendências e descontinuidades, e discutir a compatibilidade dessas alterações com a presença de reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). A partir das análises realizadas, considera-se que o objetivo geral foi atingido, uma vez que se estruturou uma base de dados consistente, aplicaram-se testes estatísticos adequados e produziu-se um diagnóstico comparável entre postos e Regiões Hidrográficas.

A partir da base inicial de 67 estações, foram selecionadas 24 séries com extensão mínima de 30 anos e percentual de falhas inferior a 10%, abrangendo o período de 1962 a 2023 e distribuídas em 9 Regiões Hidrográficas com duração mínima de 30 anos e percentual de falhas inferior a 10%, abrangendo o período de 1962 a 2023 e distribuídas em 9 Regiões Hidrográficas.

Foram identificadas tendências estatisticamente significativas em 17 das 24 estações (70,8%) e rupturas significativas em 14 estações (58,3%), com direção majoritariamente decrescente (τ negativo em 95,8% das séries) e inclinações de Sen predominantemente negativas (mediana de $-0,090 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$, com valores mínimos chegando a $-1,801 \text{ m}^3/\text{s}/\text{ano}$). Os pontos de mudança estimados concentraram-se entre 1989 e 2011, indicando a ocorrência de alterações mais abruptas em períodos específicos, além de mudanças graduais ao longo das décadas. Esses resultados fundamentaram a classificação das séries em Natural/Estável, Alterada e Fortemente alterada.

A comparação do ano de mudança indicado pelo teste de Pettitt com o ano de construção em operação de reservatórios, adotando-se uma janela de tolerância de ± 5 anos, apontou compatibilidades relevantes quando considerada a presença de pelo menos um reservatório associado à bacia de contribuição. Observou-se que a coincidência temporal foi mais frequente quando analisado o conjunto de açudes a montante do que quando a avaliação foi restrita ao reservatório principal, sugerindo que as alterações detectadas podem refletir o efeito combinado de intervenções distribuídas ao longo das bacias, além da influência de empreendimentos de maior porte.

Embora os objetivos propostos tenham sido atendidos, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos resultados, não houve a aplicação de autocorrelação temporal para correção nos testes, o que pode afetar a significância estatística

em determinadas séries. Também não foram incorporadas variáveis climáticas, como precipitação ou índices de variabilidade, o que limita a separação explícita entre efeitos climáticos e antrópicos. Por fim, a relação reservatório-estação foi construída a partir de inventário e análise espacial das bacias de contribuição, o que envolve incertezas inerentes ao delineamento e às representações adotadas; assim, as coincidências temporais discutidas devem ser compreendidas como indícios de compatibilidade, e não como comprovação.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se avaliar a sensibilidade dos resultados à dependência temporal, aplicando versões modificadas do teste de Mann-Kendall com correção para autocorrelação, além de expandir a investigação para escalas mensais e sazonais e para métricas complementares, como vazões mínimas, máximas e curvas de permanência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Manual de procedimentos para a instalação, operação e manutenção de estações fluviométricas**. Brasília: ANA, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Cartilha do observador: fluviometria**. 3. ed. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ana.gov.br>. Acesso em: 08/12/2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Orientações e manuais: monitoramento hidrológico**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/monitoramento-hidrologico/orientacoes-manuais>. Acesso em: 08/12/2025.

ARAÚJO, J. C. de; LANDWEHR, T.; ALENCAR, P. H. L.; PAULINO, W. D. **Water Management causes increment of reservoir silting and reduction of water yield in the semiarid State of Ceará, Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 121, 104102, 2023.

HELSEL, D. R. et al. **Statistical methods in water resources**. Techniques and Methods 4-A3. Reston: U.S. Geological Survey, 2020.

HIPEL, K. W.; MCLEOD, A. I. **Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems**. Elsevier, 1994.

JOSEPH, J. F.; FALCON, H. E.; SHARIF, H. O. Hydrologic Trends and Correlations in South Texas River Basins: 1950-2009. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 2, p. 1653-1662, 2013. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000709](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000709).

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. 4. ed. London: Griffin, 1975.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. **Change detection in hydrological records - a review of the methodology**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 49, n. 1, p. 7-19, 2004.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C. de; GÜNTNER, A. **Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil**. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 1, p. 109-117, 2012.

MANN, H. B. **Nonparametric Tests Against Trend**. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245, jul. 1945.

MARTINS, Antonio Duarte. **Análise de estacionariedade das séries de precipitações da região hidrográfica cearense do rio Poti utilizando testes estatísticos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Crateús, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/69930>. Acesso em: 16/07/2025.

MILLY, P. C. D. et al. **Stationarity Is Dead: Whither Water Management?** *Science*, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 1 fev. 2008.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Análise de Séries Temporais**. São Paulo: Blucher, 2006.

PEREIRA, B.; MEDEIROS, P.; MEIRA NETO, A. A.; ARAÚJO, J. C. de; SIVAPALAN, M. **Advancing water security in semi-arid Brazil: expansion of water storage infrastructure and human-water system co-evolution**. *Frontiers in Water*, v. 7, 1602146, 2025.

PETTITT, A. N. **A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem**. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126, 1979.

PROSDOCIMI, P.; KJELDSSEN, T. R.; SVENSSON, C. **Nonstationarity in maximum annual daily streamflow series from Southern Brazil**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2014.

RABELO, Nosliana Nobre. **Análise da segurança hídrica no Estado do Ceará: subsídios para o planejamento e gestão dos recursos hídricos**. 2022. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SANTOS, João Filipe; PORTELA, Maria Manuela; SANTOS, João. **Tendências em séries de precipitação mensal em Portugal continental: aplicação do teste de Mann-Kendall**. 2007.

SANTOS, T. V. dos et al. **Teste de Mann-Kendall aplicado a dados hidrológicos - desempenho dos filtros TFPW e CV2 na análise de tendências**. *Ciência e Natura*, v. 42, e87, 2020.

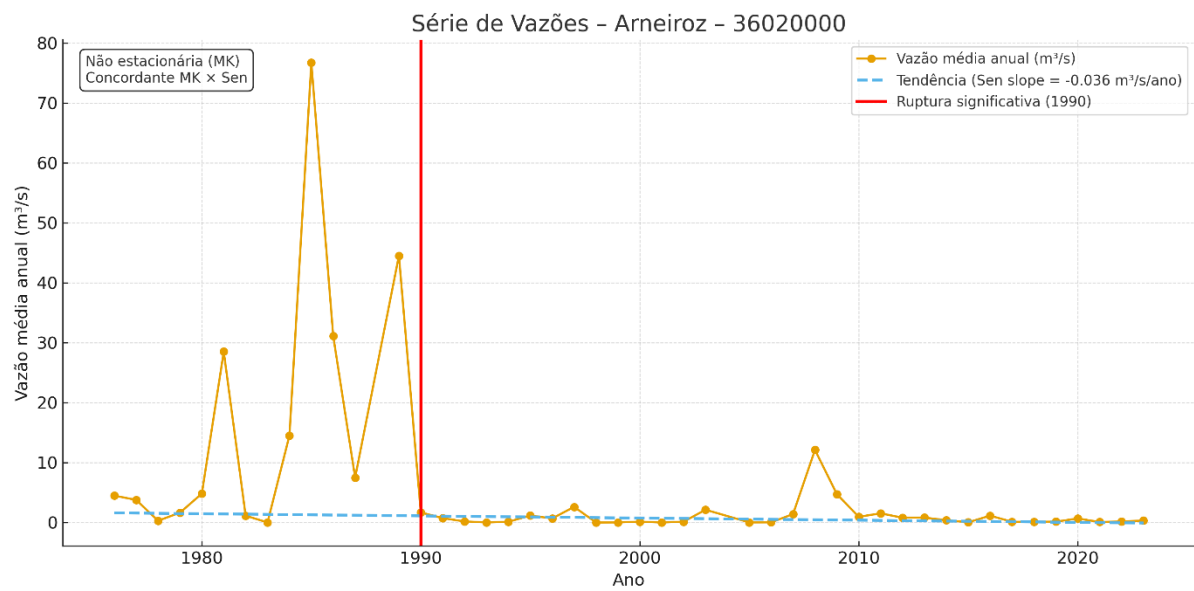
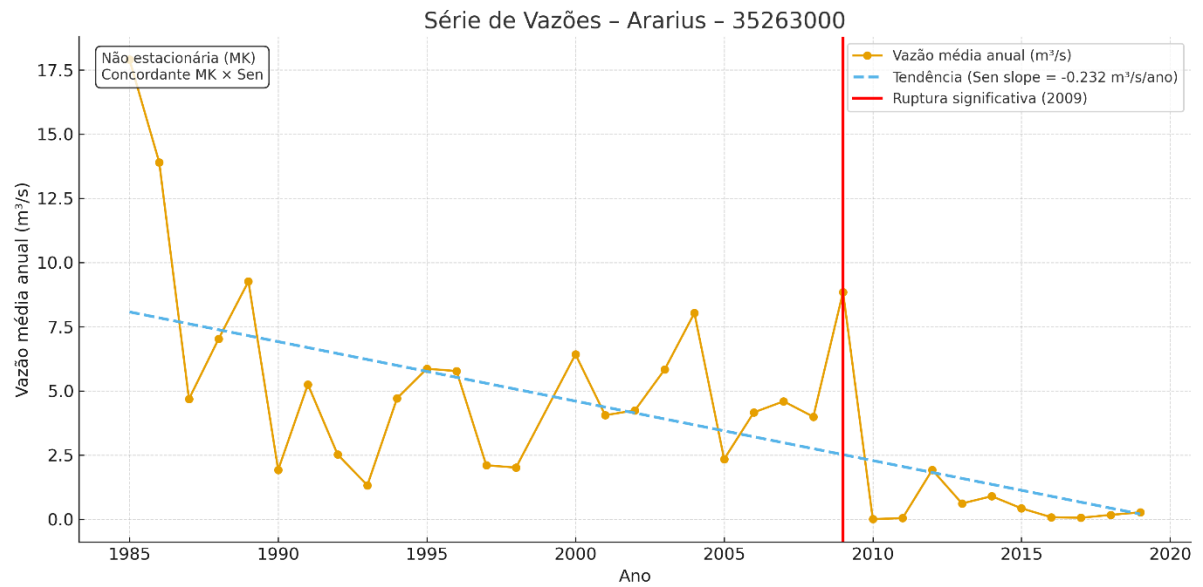
SEN, P. K. **Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau**. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

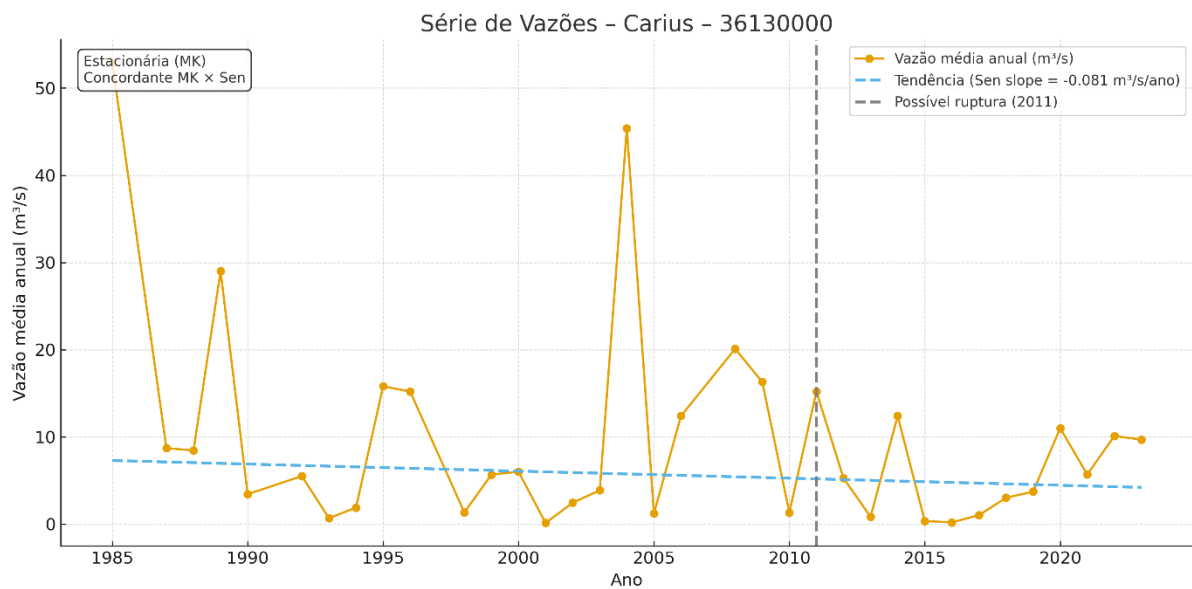
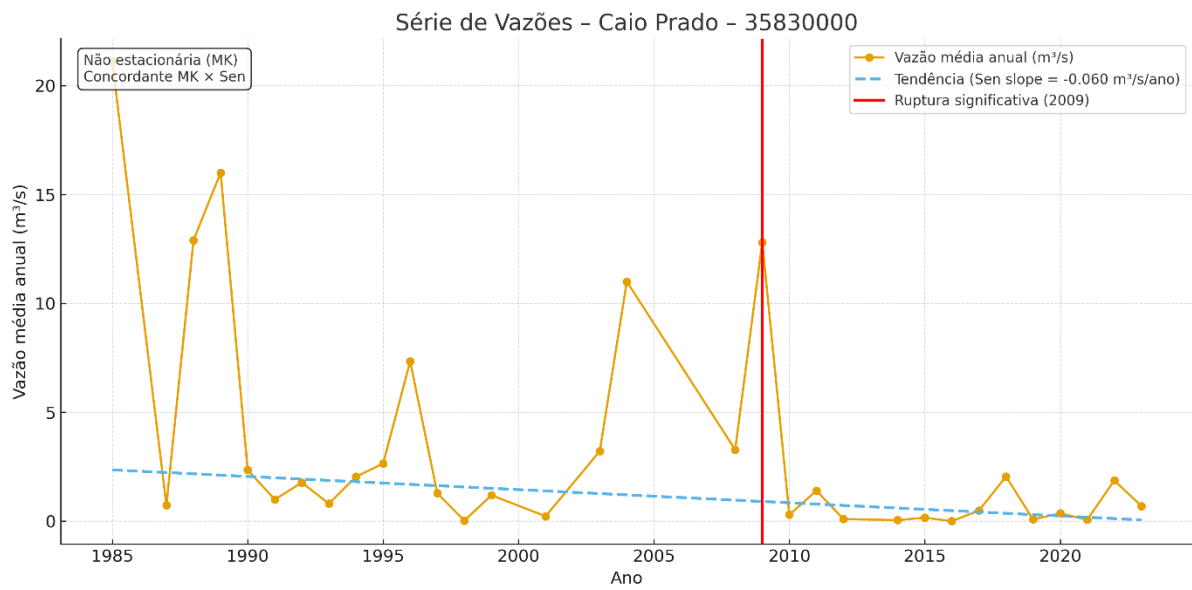
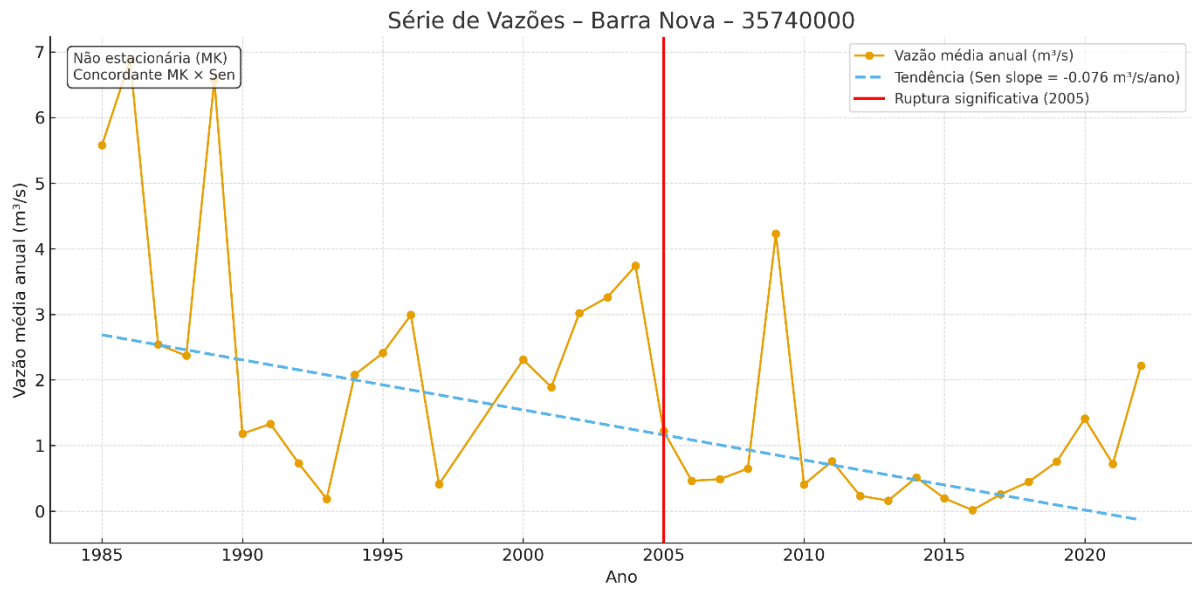
SRAJ, M. et al. **Multiple causes of nonstationarity in the Weihe annual low-flow series.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, p. 1525-1548, 2018.

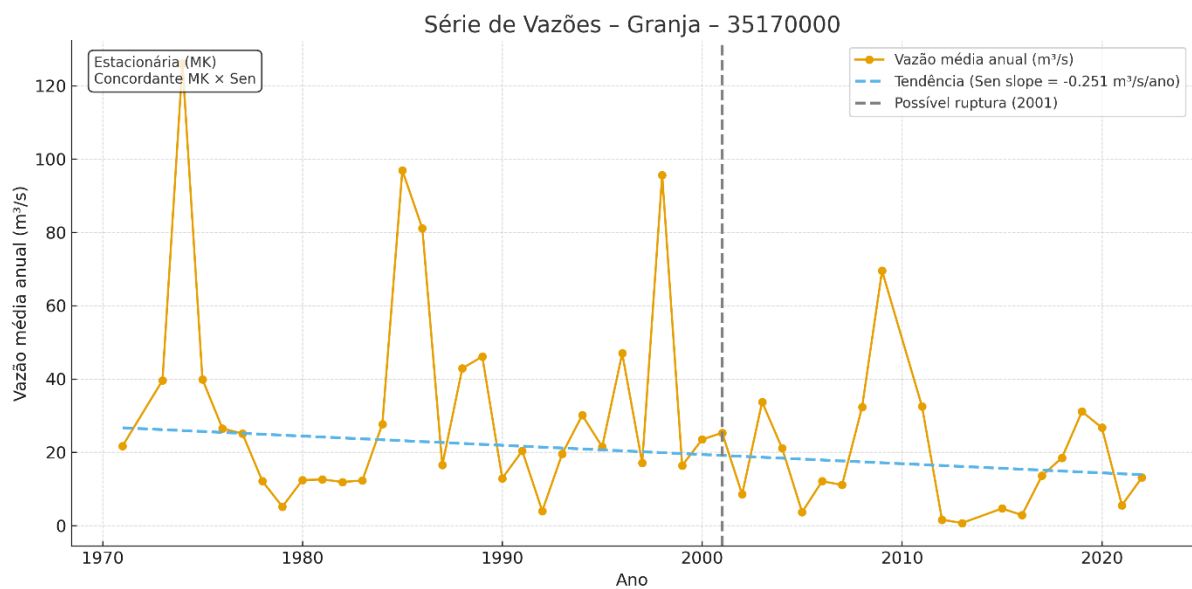
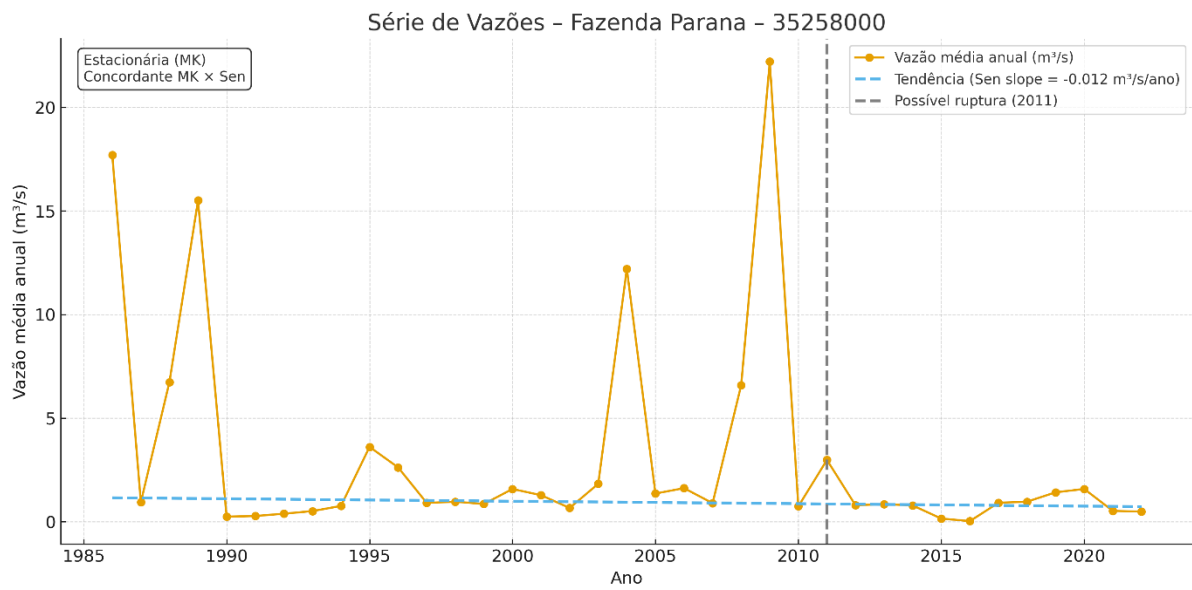
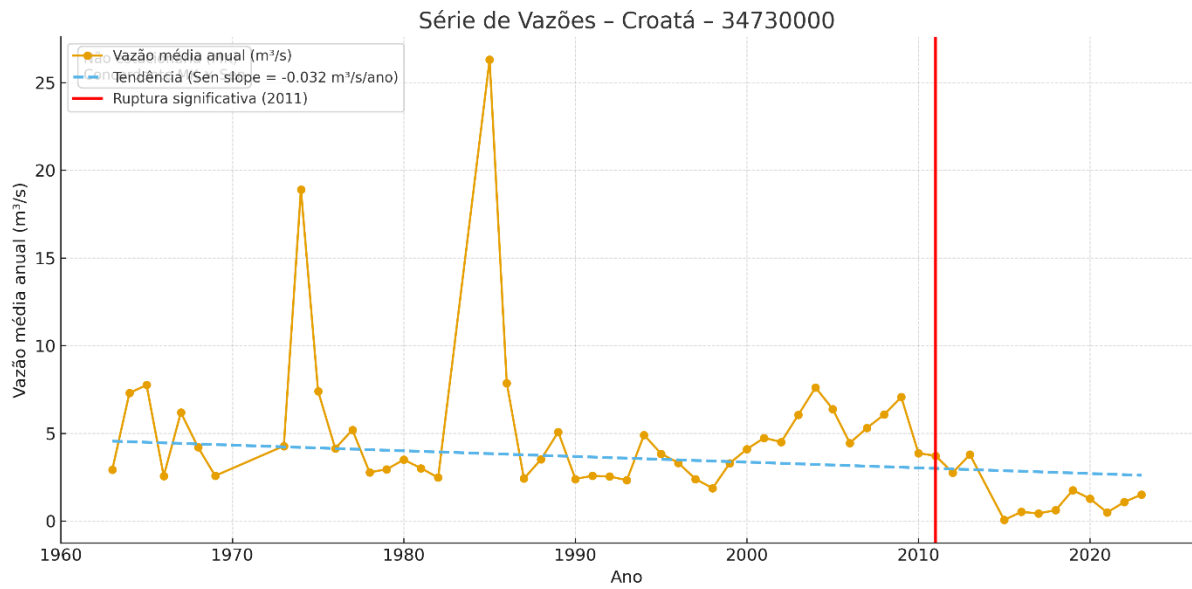
THIESE, M. S.; RONNA, B.; OTT, U. **P Value Interpretations and Considerations.** Journal of Thoracic Disease, v. 8, n. 9, p. E928-E931, set. 2016.

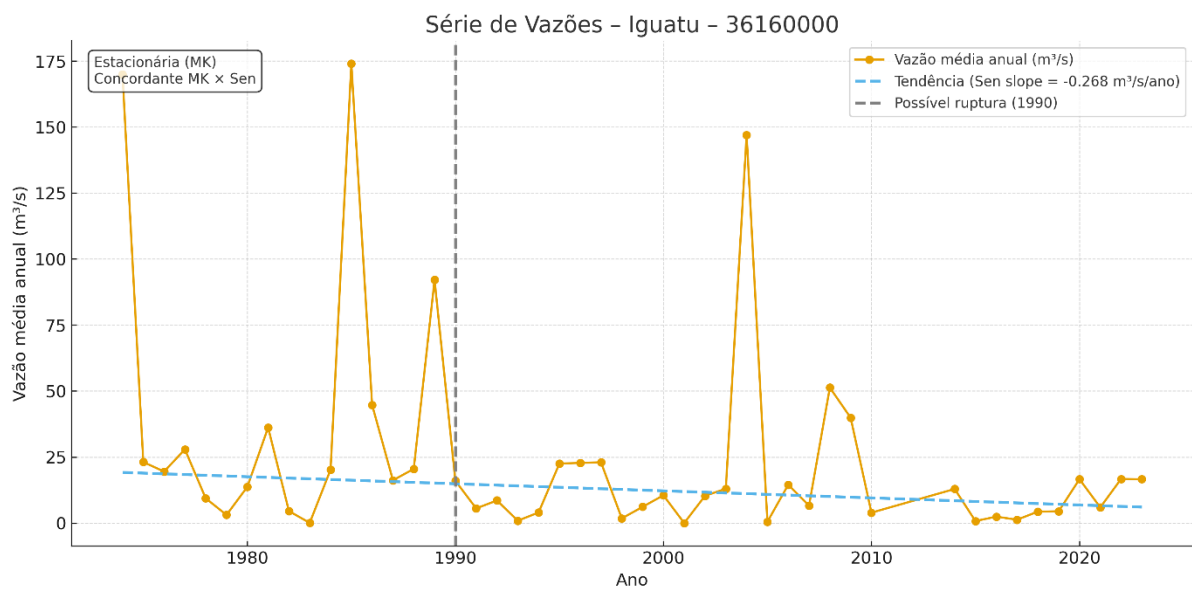
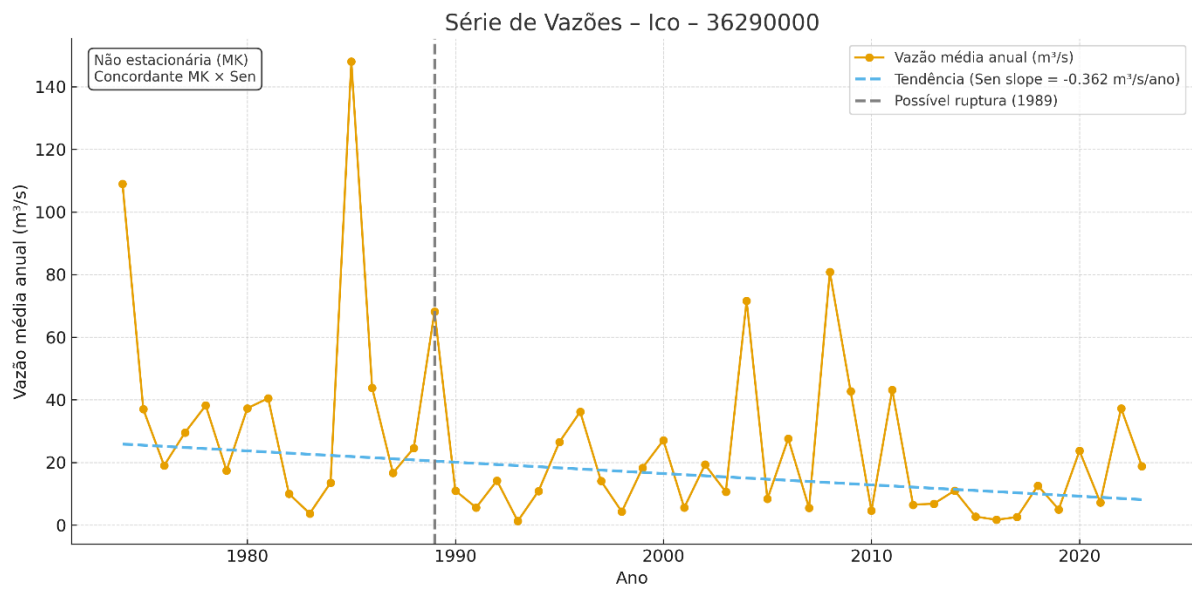
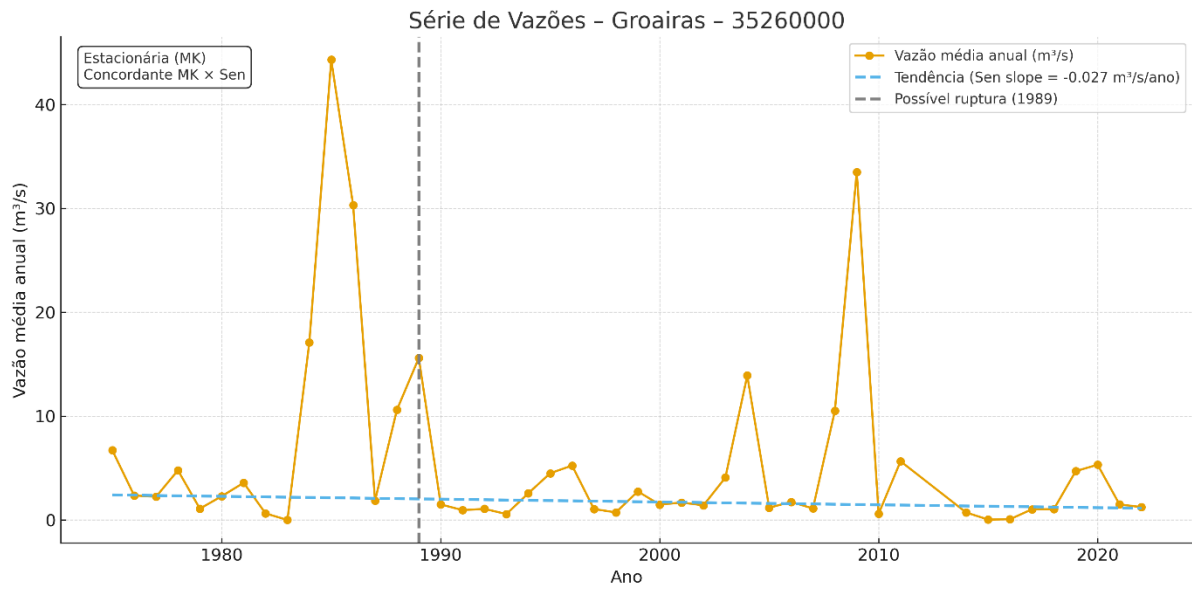
TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

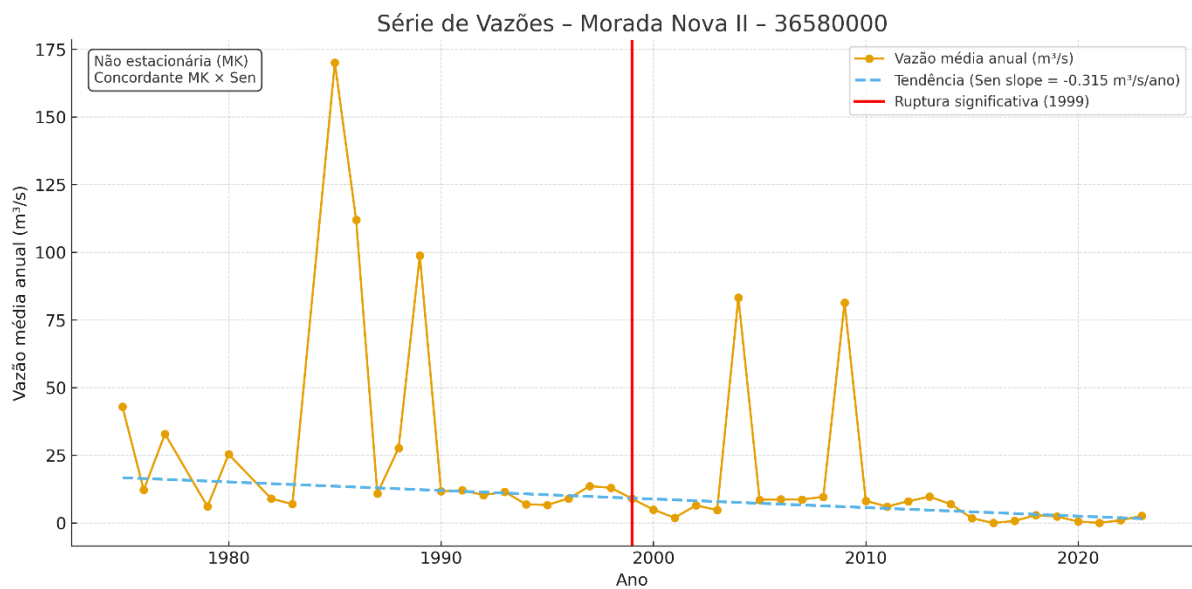
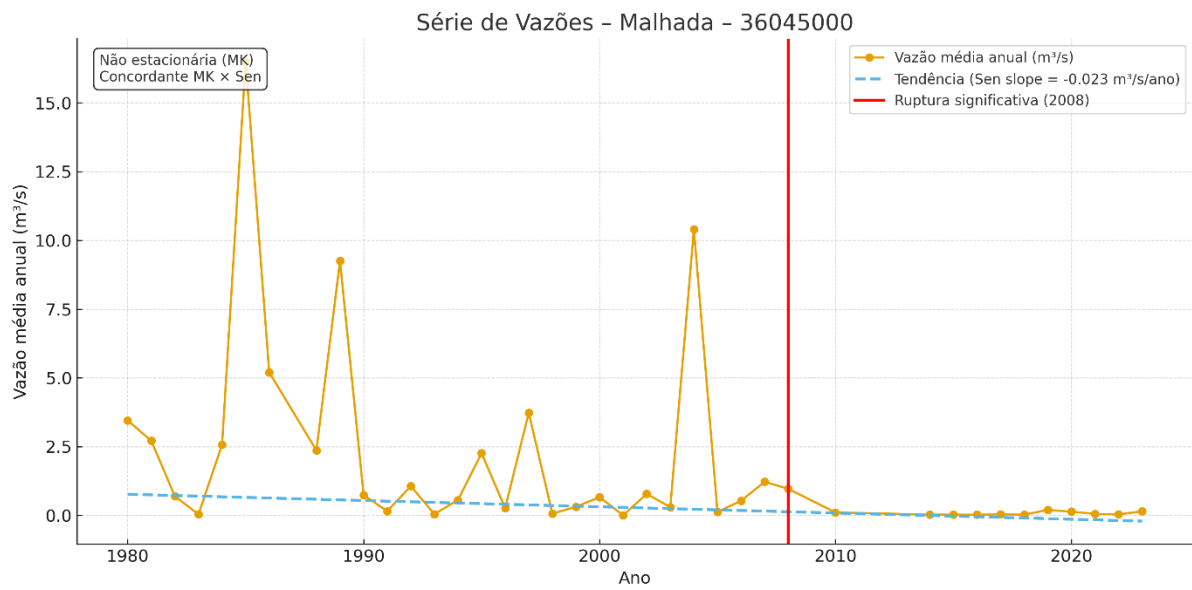
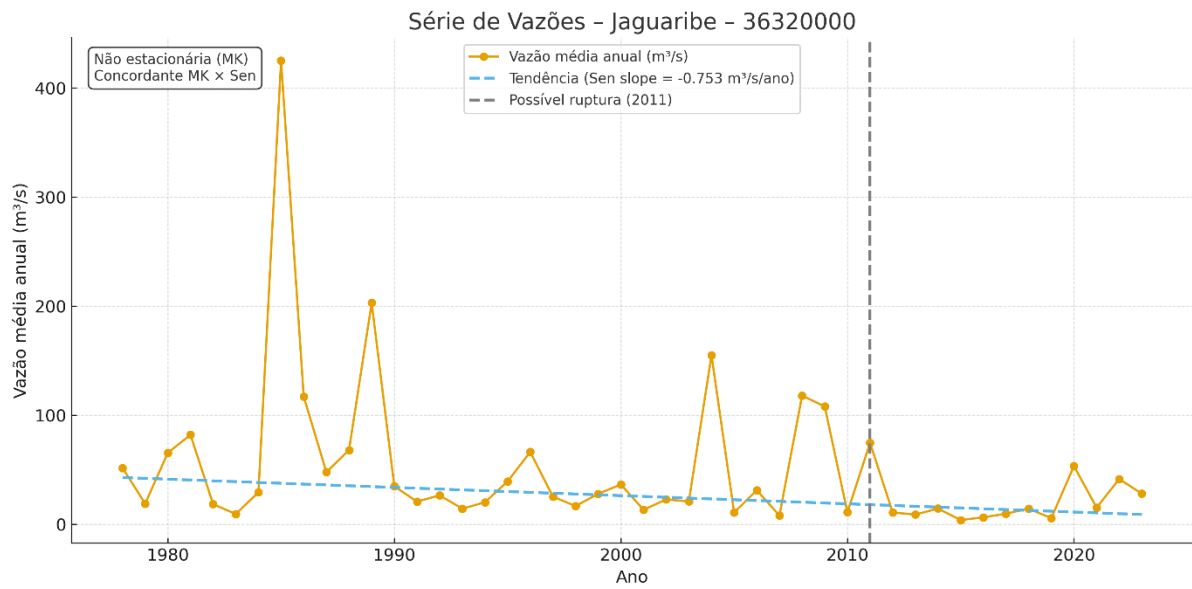
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TENDÊNCIAS DAS ESTAÇÕES

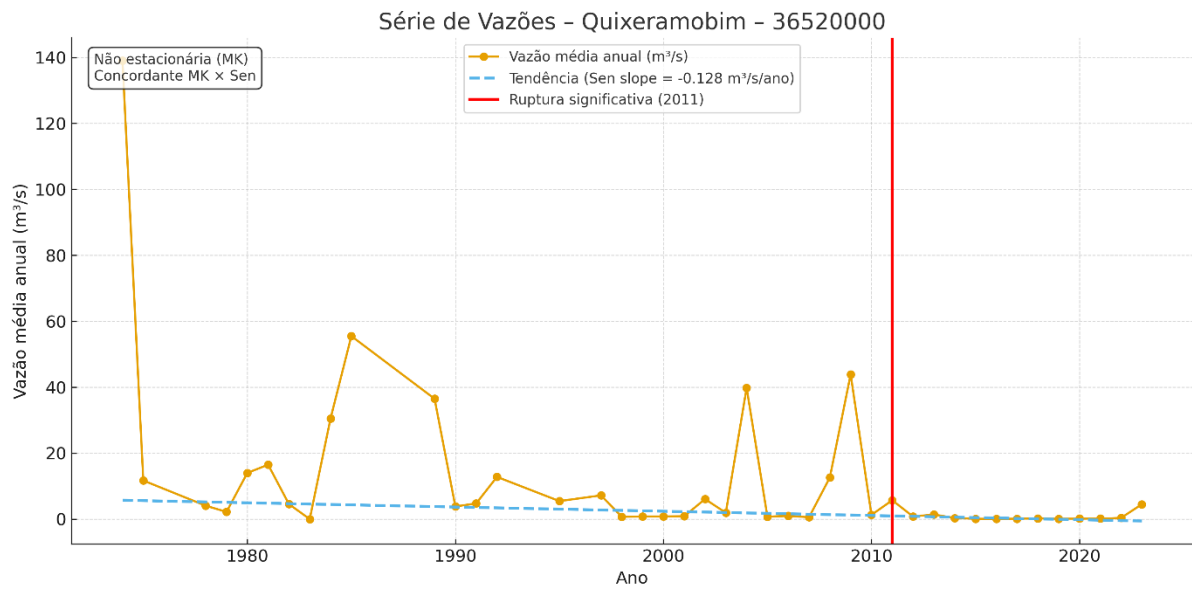
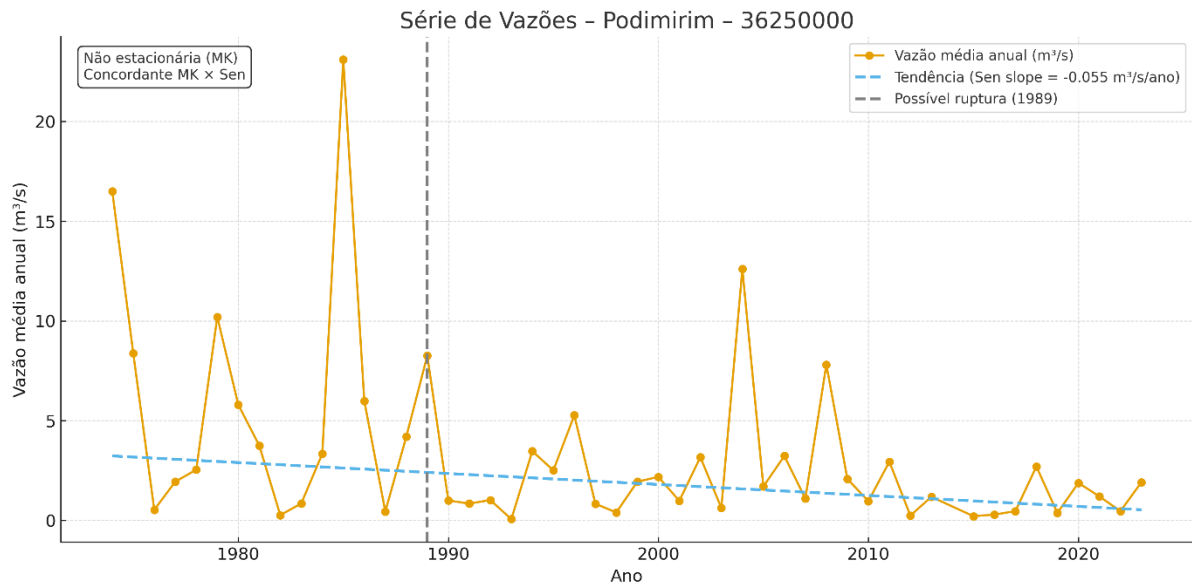
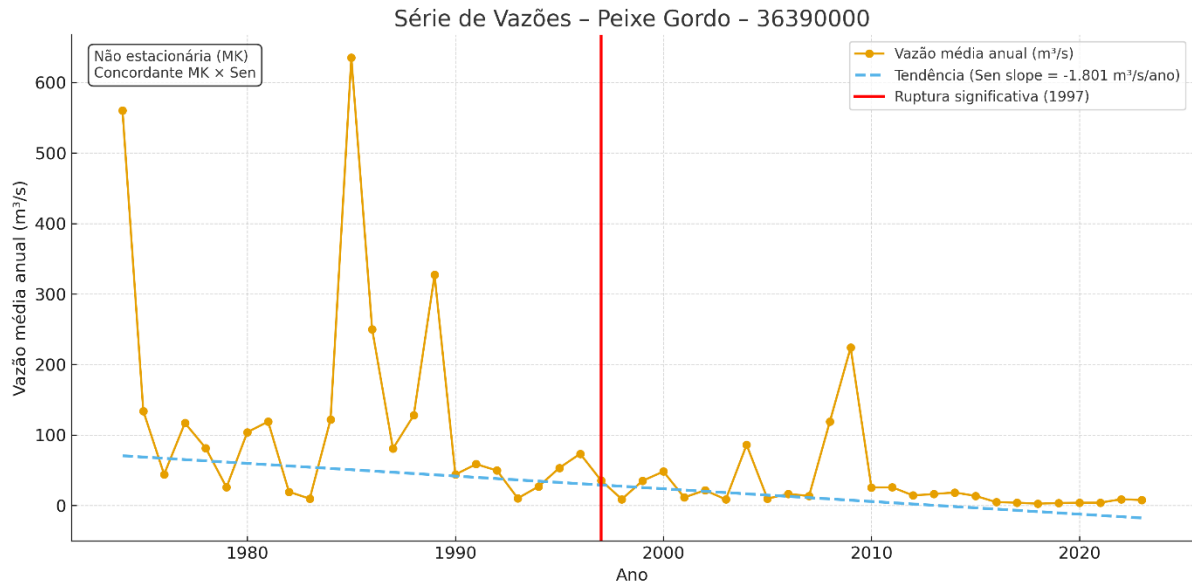


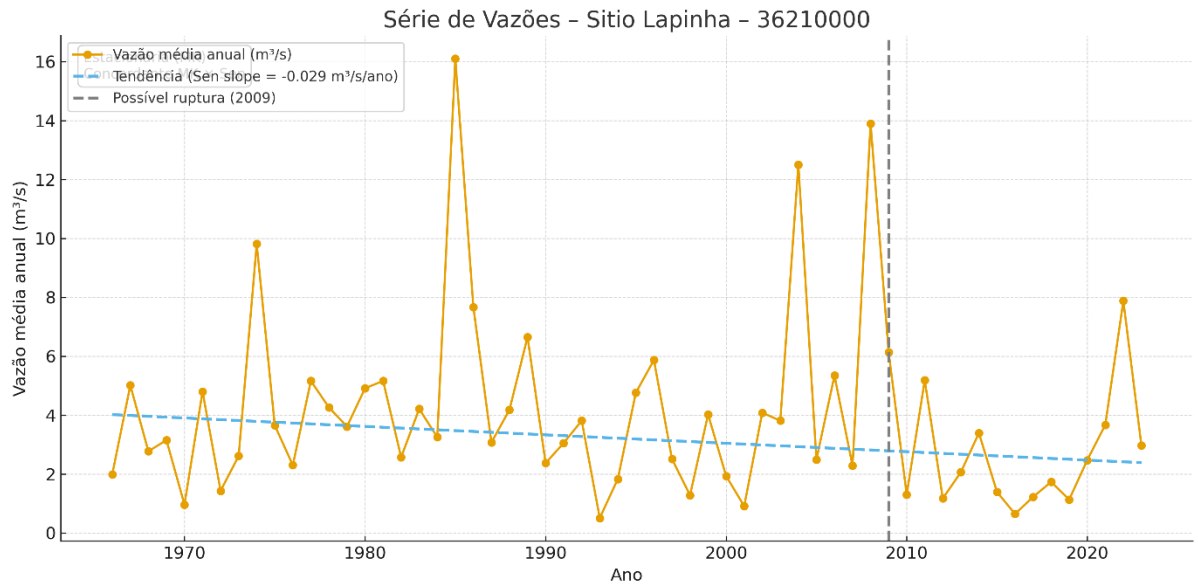
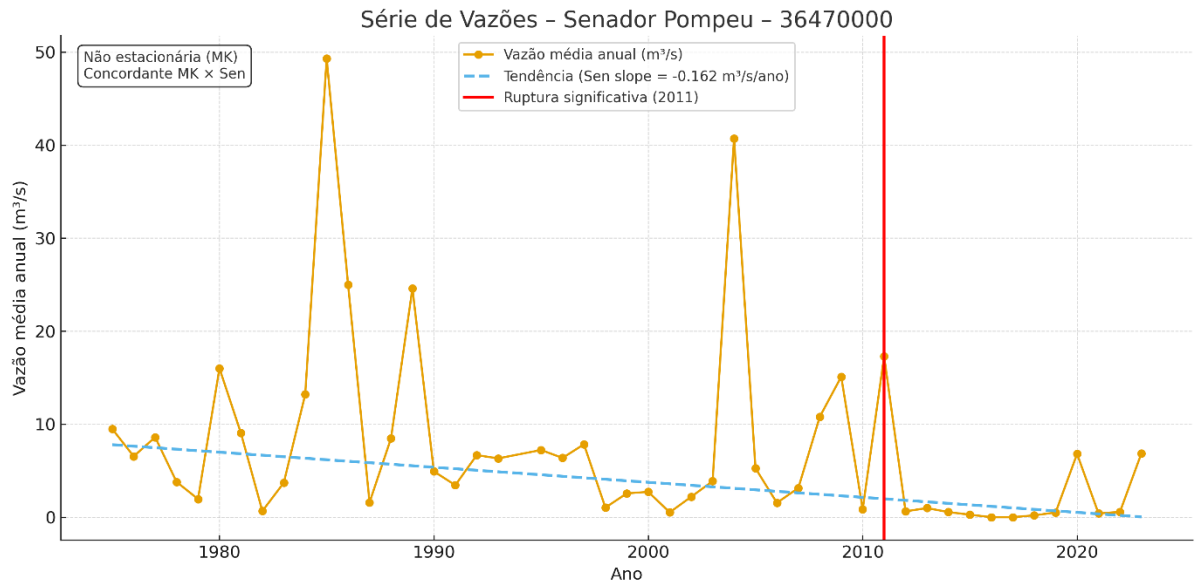
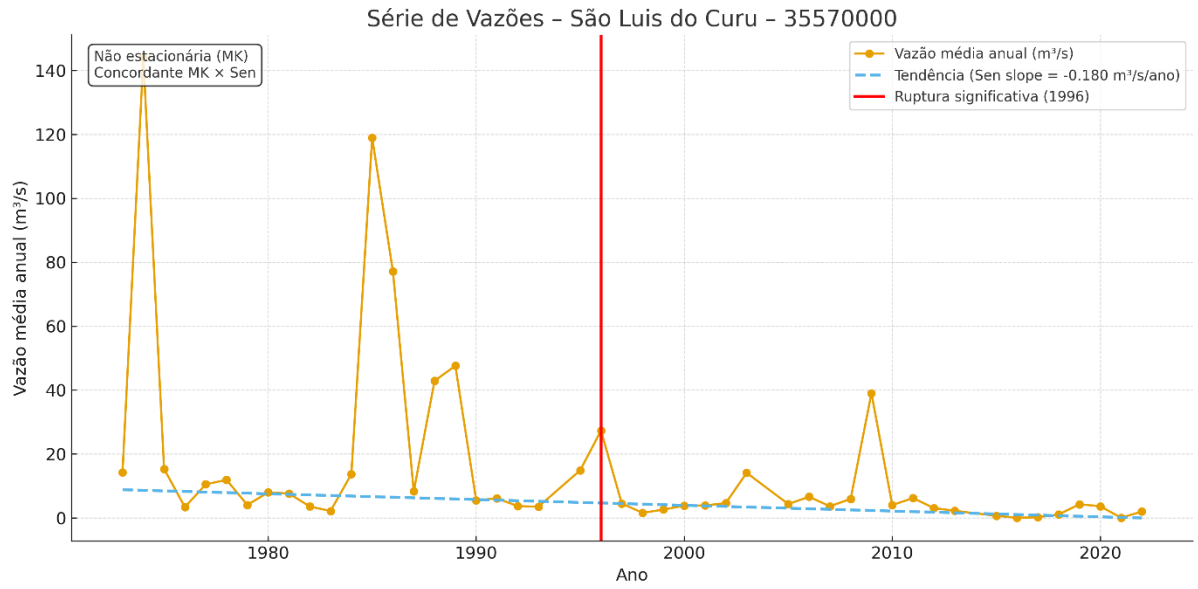




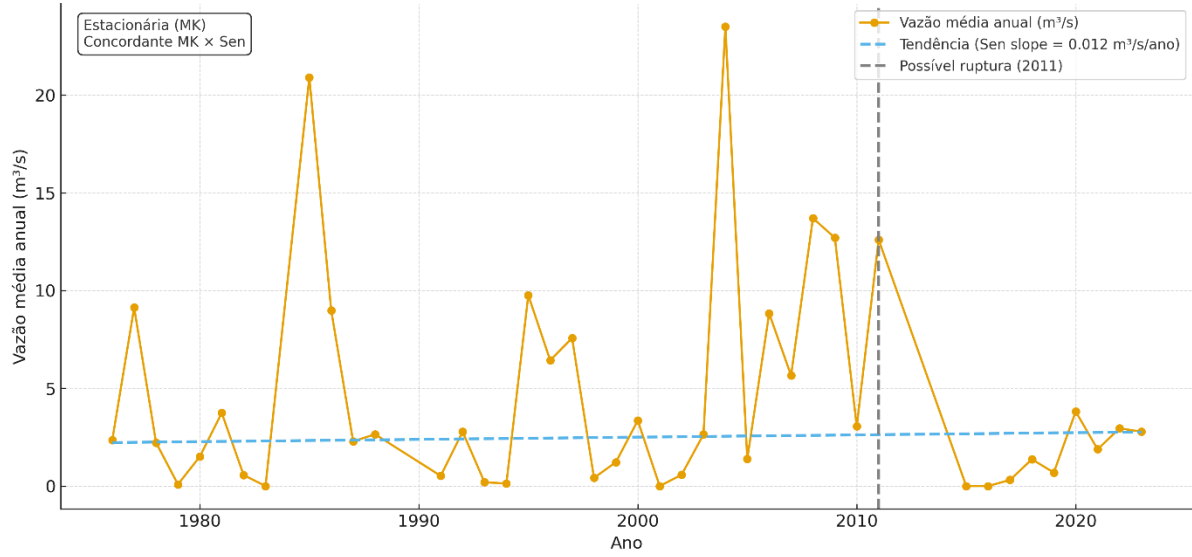








Série de Vazões - Sítio Poço Dantas - 36125000



Série de Vazões - Sobral - 35275000

