



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

WEYDER FREIRE SANTOS DE MENEZES

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS EM EVENTOS
EXTREMOS DE SECA INFLUENCIADOS PELO ENSO (EL NIÑO –
SOUTHERN OSCILLATION) E SEU COMPORTAMENTO FACE À
DINÂMICA ESTUARINA: MARANHÃO – BRASIL

SÃO LUÍS – MA

2024

WEYDER FREIRE SANTOS DE MENEZES

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS EM EVENTOS
EXTREMOS DE SECA INFLUENCIADOS PELO ENSO (EL NIÑO –
SOUTHERN OSCILLATION) E SEU COMPORTAMENTO FACE À
DINÂMICA ESTUARINA: MARANHÃO – BRASIL

Dissertação apresentada ao programa de pós-
graduação em oceanografia na Universidade
Federal do Maranhão para obtenção do título
de Mestre em Oceanografia.

Área de estudo: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos - Caracterização oceanográfica da plataforma continental e dos estuários que deságuam na Margem Equatorial Brasileira face a cenários de mudanças climáticas e a expansão portuária.

Orientador: Francisco José da Silva Dias

SÃO LUÍS – MA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALUNO: Weyder Freire Santos de Menezes

ORIENTADOR: Francisco José da Silva Dias

Banca examinadora

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Junior
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra
Universidade Federal do Maranhão

Menezes, Weyder Freire Santos de.

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS EM EVENTOS EXTREMOS DE SECA INFLUENCIADOS PELO ENSO EL NIÑO SOUTHERN OSCILLATION E SEU COMPORTAMENTO FACE À DINÂMICA ESTUARINA: MARANHÃO BRASIL / Weyder Freire Santos de Menezes. - 2024.

45 p.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2024.

1. CESM. 2. El Niño. 3. ENSO. 4. Vazão ecológica.
I. Silva Dias, Francisco José da. II. Título.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*

ANA – Agência Nacional de Águas

CRU – Climate Research Unit

ENSO – El Niño – Southern Oscillation

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ION – Índice Oceânico Niño

MLME – Modelo linear de Mistura Espectral

MMS – Média Móvel Simples

Q7,10 – Vazão mínima de 7 dias para um período de retorno de 10 anos

Q90 – Vazão com permanência de 90%

Q95 – Vazão com permanência de 95%

R² – Coeficiente de Determinação

SMA – Simple Moving Average

TSM – Temperatura Superficial do Mar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre o ION e as precipitações em Barra do Corda – MA. Fonte: MENEZES, 2021.

Figura 2. Relação entre o ION e as vazões em Barra do Corda – MA. Fonte: MENEZES, 2021.

Figura 3. Complexo Estuarino de São Marcos. Fonte: Vasconcelos et al. 2018.

Figura 4. Estações fluviométricas presentes em rios com influência direta no CESM. Fonte: Autoral

Figura 5. Malha espacial utilizada para delimitar a área dos dados de precipitação próximo as estações de coleta de dados de vazão, no Rio Mearim. Fonte: Autoral

Figura 6. Ilustração da região Niño 3.4. Fonte: Lindsey, 2009

Figura 7. Mapa das seções utilizadas. Fonte: Autoral.

Figura 8. Gráfico Altura x Tempo para a coleta das seções 01, 02, 03 e 04. Fonte: Autoral

Figura 9. Curva-chave sem ajuste para o Rio Mearim, mostrando a baixa adesão dos dados à curva (retângulos vermelhos). Fonte: Autoral

Figura 10. Curva-chave ajustada para o Rio Mearim, com melhor adesão dos dados às curvas polinomiais. Fonte: Autoral.

Figura 11. Curva-chave para o Rio Grajaú, mostrando que a função polinomial adotada se distribui de forma satisfatória sobre a nuvem de dados existente. Fonte: Autoral

Figura 12. Gráficos de comparação ENSO x Variação de Precipitações Mínimas para os rios Gurupi, Itapecuru e Parnaíba. Fonte: Autoral.

Figura 11. Batimetria do CESM. Fonte: Rosman e outros, 2018.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Vazões outorgáveis para as cidades de Barra do Corda e Bacabal, usando vazões Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10}. Fonte: MENEZES, 2021.

Tabela 02. Estações do sistema HIDROWEB utilizadas. Fonte: HIDROWEB.

Tabela 03. Vazões de referência Q_{7,10}; Q₉₀; Q₉₅ para os rios estudados. Fonte: Autoral

Tabela 04. Equações da curva-chave para as estações estudadas. Fonte: Autoral.

Tabela 05. Componentes básicas adquiridas na seção 02; Fonte: Autoral

Tabela 06. Dados obtidos pela relação entre dados e ADCP e da ANA para a seção 01. Fonte: Autoral.

Tabela 07. Área das seções abrangidas pelas estações fluviométricas estudadas. Fonte: Autoral.

Tabela 08. Área da seção do ADCP. Fonte: Autoral.

RESUMO

Este estudo aborda as influências da variação do Índice Oceânico Niño nas vazões mínimas em períodos de seca extrema no estado do Maranhão, baseado no fenômeno El-Niño Oscilação-Sul (ENSO), e explora os diferentes cenários da vazão de água doce presente do Complexo Estuarino de São Marcos (CESM). A análise dos dados da Agência Nacional de Águas (ANA) mostrou que, para o Rio Mearim - de maior contribuição no estuário de São Marcos - há uma vazão de referência Q7,10 de 30,36m³/s com base na estação automática mais próxima da foz. Os dados provenientes de bancos de dados de estações de coleta automática são ainda comparados com perfis do Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) traçados diretamente no ambiente estuarino com o objetivo de estudar a relação entre os dados com e sem influência da maré. Para as vazões obtidas diretamente na foz, o valor chega a 70,44m³/s, enquanto a vazão média de água doce para o mesmo local com base em dados da ANA foi de 651,85m³/s. A comparação das vazões utilizando o parâmetro da salinidade abriu margem para interpretações da influência da coluna de água da maré sobre a vazão de água doce na região, mostrando a forte mudança no comportamento em diferentes ambientes.

Palavras-chave: Vazão ecológica, ENSO, El Niño, CESM.

ABSTRACT

This study addresses the influences of the Niño Oceanic Index variation on minimum flows in periods of extreme drought in the state of Maranhão, based on the El-Niño Southern Oscillation (ENSO) anomaly, and explores the different scenarios of the current freshwater flow of Complexo Estuarino de São Marcos (CESM). Analysis of data from Agência Nacional de Águas (ANA) showed that, for the Mearim River - with the greatest contribution to the São Marcos estuary - there is an reference flow $Q_{7.10}$ of $30.36\text{m}^3/\text{s}$ based on the automatic station closest to the mouth. Data from automatic collection station databases are also compared with Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) profiles traced directly in the estuarine environment with the aim of studying the relationship between data with and without tidal influence. For flows obtained directly at the mouth, the value reaches $70.44\text{m}^3/\text{s}$, while the average freshwater flow for the same location based on ANA data was $651.85\text{m}^3/\text{s}$. The comparison of flows using the salinity parameter opened the way for interpretations of the influence of the tidal water column on the freshwater flow in the region, showing the strong change in behavior in different environments.

Keywords: Ecological Flow, ENSO, El Niño, CESM.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 HIPÓTESE E OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Aquisição dos dados	19
3.2 Vazões ecológicas	24
3.3 Volume de água doce	27
3.4 Cruzamento de dados	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1 – Ações antrópicas	35
4.2 – Ações naturais	35
5 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE I	43

1 INTRODUÇÃO

A Base de Dados de Desastres Internacionais (EM-DAT, 2021) mostra que a frequência da ocorrência de eventos extremos de clima tem aumentado nos anos recentes. Dentre esses eventos, destacam-se as secas extremas que, citadas por Ning et al. (2019), têm apresentado maior número de ocorrência das últimas décadas em diversas regiões do planeta.

Secas caracterizam-se como longos períodos com escassez hídrica, resultado de um regime de precipitação muito abaixo da média ou inexistente, com o déficit de precipitação podendo se estender por meses, até representar de fato uma redução da reserva hídrica de uma região. Por isso é difícil prever uma seca e até mesmo saber quando ela acabou, visto que, mesmo com a normalização do regime de precipitações, a seca pode perdurar até que as reservas hídricas sejam normalizadas aos níveis de confiança (WILHITE, 2000).

Marengo et al. (2018) destacam a influência do El Niño – Southern Oscillation (ENSO) nas secas do nordeste brasileiro, mostrando uma forte relação entre o fenômeno El Niño/La Niña com a alteração do regime de precipitação na região. O ENSO caracteriza-se por uma flutuação periódica na temperatura da superfície do mar (El Niño) e na pressão do ar da atmosfera sobrejacente (Oscilação Sul) no Oceano Pacífico equatorial (NOAA, 2021).

Baseado nisso, entende-se que a ocorrência de eventos de seca extrema é fortemente influenciada por variações anormais do Índice Oceânico Niño (ION), usado como parâmetro de medição do ENSO, como mostram as Figuras 1 e 2 (MENEZES, 2021). A relação entre a precipitação, vazão e o ION na cidade de Barra do Corda, banhada pelo Rio Mearim, no Maranhão mostra um padrão de comportamento onde a baixa do ION (que representa a ocorrência de La Niña) influencia na alta da precipitação, que logo gera consequências na vazão. O contrário também é observado, quando o ION apresenta valores positivos, representando o período de El Niño, há vazões mínimas anuais inferiores.

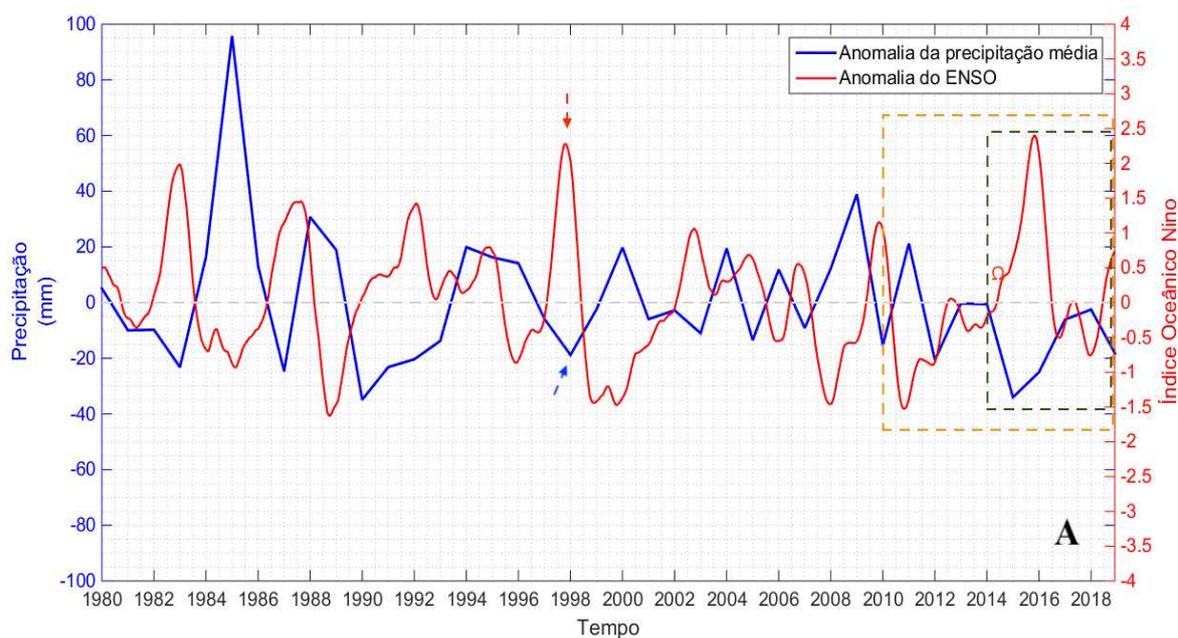


Figura 1: Relação entre o ION e as precipitações em Barra do Corda – MA.

Fonte: MENEZES, 2021.

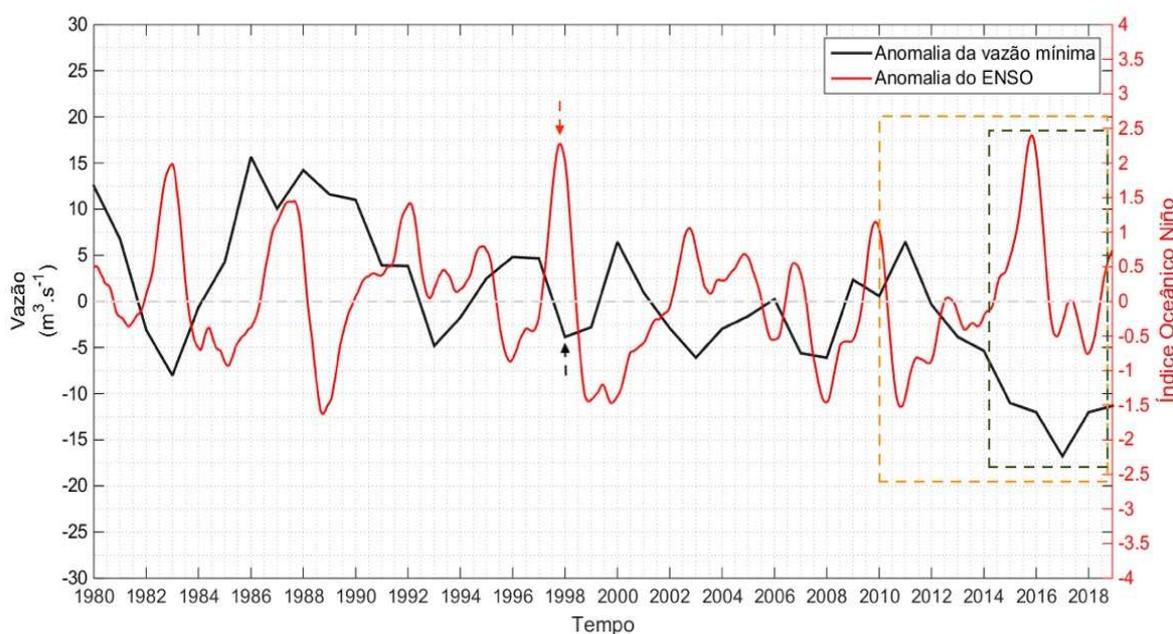


Figura 2: Relação entre o ION e as vazões em Barra do Corda – MA.

Fonte: MENEZES, 2021.

O estado do Maranhão possui área de 329.651,495 km², sendo o oitavo maior estado do Brasil e o segundo maior da região Nordeste (IBGE, 2021). A área do estado abrange cerca de 90% da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, uma das 12 regiões hidrográficas do Brasil, que é ainda subdividida em diversas sub-bacias: Bacia de Gurupi,

Bacia de Pericumã, Bacia de Itapecuru, Bacia de Mearim, Bacia Munim, Bacia de Turiaçu e o litoral maranhense. Além disso, o estado também se encaixa na região do Alto Parnaíba, uma das três porções da Região Hidrográfica do Parnaíba, e possui ainda 3,8% do seu território inserido na região do Tocantins Alto, na Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia (NUGEO, 2021).

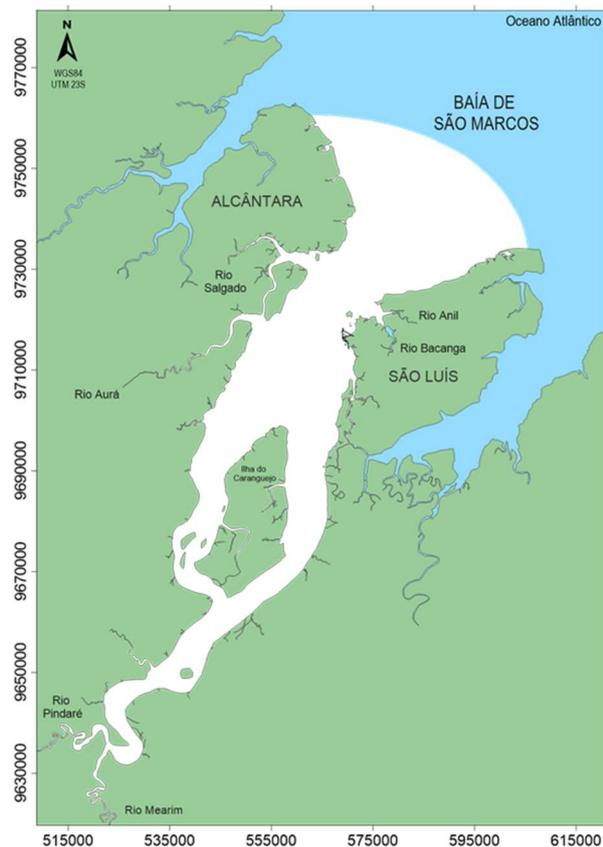


Figura 3: Complexo Estuarino de São Marcos. Fonte: Vasconcelos et al. 2018.

Vazões ecológicas são uma ferramenta de análise que permitem estabelecer parâmetros importantes para a utilização de recursos hídricos. Segundo Lamparelli (2019), a vazão ecológica é um regime de vazões mínimas que devem ser mantidas no rio para atender aos múltiplos usos do ecossistema aquático. Neste cenário, o fator antrópico gera preocupação pelo seu potencial de transformação e interferência na natureza.

O alto crescimento populacional está diretamente ligado ao aumento da demanda hídrica que, se for feito sem definições de limites, gera uma utilização desenfreada que tende a prejudicar o meio ambiente, principalmente em períodos de seca.

A regionalização das vazões ecológicas em períodos de seca extrema na região do nordeste brasileiro representa um estudo de elevada importância. No estado do Maranhão, o

Rio Mearim, por exemplo, é local de pesca, via de transporte (Hidrovia do Mearim) e fonte de desvios de vazão para rizicultura e carcinicultura, desaguando em São Luís, onde há forte presença da atividade portuária – destacando-se o Porto do Itaqui. Por isso é preciso propor parâmetros de desenvolvimento baseado nas condições de suporte de vazões em toda a sua extensão territorial.

A navegação praticada na Hidrovia do Mearim, também é composta pelos seus afluentes Grajaú e Pindaré, sendo este último a ligação natural com a Baixada Ocidental Maranhense. O rio Mearim abastece com água potável todas as cidades ribeirinhas e ainda outras cidades localizadas na área de influência de sua bacia. É utilizado, também, para o abastecimento de indústrias implantadas nas proximidades do seu curso, servindo ainda, na captação de água para irrigação de projetos agropecuários localizados em suas margens. (MINFRA, 2015)

O conhecimento adequado dos processos hidrológicos é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos em uma bacia de drenagem, principalmente no que concerne a dinâmica dos fluxos fluviais e a disponibilidade hídrica. Nisto se insere, de acordo com Maciel (2017), a análise do regime de vazões que permita o equacionamento da oferta e volume de água dos cursos d'água, utilizado em tomadas de decisões orientadas a racionalização e preservação deste recurso. A manutenção da bacia de drenagem consiste em oferecer condições necessárias para que todas as funções que ela desempenha, e as que dependem dela, sejam efetuadas dentro da normalidade. Isso inclui um bom estado da mata ciliar para boas condições de precipitação, escoamento, vazões e uma boa gestão de outorga hídrica.

Os usos múltiplos das terras das bacias de drenagem do estado do Maranhão, causando modificações consideráveis nos últimos anos, e a relação do regime de precipitação com o fenômeno ENSO chamam atenção para a necessidade da regionalização de vazões ecológicas, buscando garantir a viabilidade do desenvolvimento da atividade portuária e a manutenção de fluxos hídricos mínimos em períodos de seca prolongada, que se mostram cada vez mais frequentes, como a observada entre 2010 e 2019 (MARENGO et al. 2019).

O método da vazão mínima de sete dias com um período de retorno de dez anos, a $Q_{7,10}$, é o mais usado como vazão de referência e ecológica atualmente pois combina um tratamento de dados que faz uso de ferramentas acessíveis com um resultado muito próximo ao observado. Farias (2006) recomenda uma vazão de referência baseada na vazão média

mínima observada durante um intervalo de sete dias consecutivos ao longo de um ano hidrológico, para um período de retorno de dez anos.

Somada à vazão ecológica, a vazão outorgável é outra ferramenta de extrema importância para a gestão hídrica, estabelecendo limites de desvio de vazão para que o rio se mantenha saudável e, para isso, a legislação de cada estado adota um método de cálculo de vazão como referência. No caso do Maranhão, é usada a vazão Q_{90} (vazão cuja permanência em um intervalo de tempo estabelecido é de 90%).

Os valores mostrados na Tabela 1 (MENEZES, 2021) exemplificam o cálculo das vazões de outorga, usando a vazão de referência Q_{90} (citada na legislação maranhense), e as demais vazões de referência.

Ponto de estudo	Vazão de referência (Q_{90})	Vazão máxima de outorga ($0,8 \cdot Q_{90}$)	Vazão máxima de outorga individual ($0,25 \cdot 0,8 \cdot Q_{90}$)
Bacabal	$38,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$31,03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$7,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Barra do Corda	$33,47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$26,78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$6,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Ponto de estudo	Vazão Q_{95}	Vazão máxima de outorga ($0,8 \cdot Q_{95}$)	Vazão máxima de outorga individual ($0,25 \cdot 0,8 \cdot Q_{95}$)
Bacabal	$30,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$24,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$6,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Barra do Corda	$29,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$23,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$5,92 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Ponto de estudo	Vazão $Q_{7,10}$	Vazão máxima de outorga ($0,8 \cdot Q_{7,10}$)	Vazão máxima de outorga individual ($0,25 \cdot 0,8 \cdot Q_{7,10}$)
Bacabal	$30,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$24,29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$6,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Barra do Corda	$27,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$21,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$5,46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabela 1: Vazões outorgáveis para as cidades de Barra do Corda e Bacabal, usando vazões Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$.

Fonte: MENEZES, 2021.

O uso de ferramentas como as curvas-chave e curva de permanência também oferece benefícios a quem precisa coletar informações sobre o estado atual do rio. A curva-chave (também conhecida como curva de descarga), por exemplo, permite estimar a vazão do rio com base em uma equação que descreva esta informação em função da leitura da cota do rio em réguas existentes ou em outras formas de medida do nível da água. Ela é gerada por meio

da interpolação de uma nuvem de pares de dados de cota e vazão coletados simultaneamente em períodos distintos.

Já a curva de permanência permite saber o grau de permanência da vazão atual com base em uma série histórica de dados locais que expressem o regime de vazões do rio estudado. Ela é uma representação visual do cálculo que permite determinar as vazões Q90 e Q95.

Clementino (2017) diz que, no Brasil e em especial no Maranhão, o estudo da atividade portuária mostra-se escasso e, na cidade de São Luís por exemplo, apresenta-se como o maior complexo portuário do Brasil em volume de carga, com perspectivas de crescimento limitados por fatores espaciais e culturais. Desse modo, um estudo detalhado do regime de vazões ecológicas em períodos de seca extrema auxilia na solução do desafio de integração do sistema porto-cidade.

A escassez de soluções para lidar com as vazões mínimas durante períodos de seca em bacias hidrográficas da região nordeste do Brasil face ao aumento da frequência de ocorrência de eventos extremos de clima e tempo (EM-DAT, 2021), como a seca prolongada de 2010 a 2019, exposta por Marengo et al. (2019), expressa a necessidade de um estudo específico para a região, correlacionando as vazões de referência de diversas bacias com dados dos períodos de seca extrema, influenciados pelo fenômeno ENSO. Sarmiento et al. (2018) em seu estudo relatam que, entre 2011 e 2019 o nordeste brasileiro tem passado pela maior seca dos últimos quarenta anos, fato que é corroborado pelos dados obtidos no trabalho de Menezes (2021).

A importância das vazões ecológicas tem seu alicerce na preservação dos cursos d'água, já que seu estudo garante a oferta mínima de água para a manutenção correta do ecossistema aquático e de todos os fatores que dependem dele. Atrelado a isso, destacam-se as vazões outorgáveis, que viabilizam a possibilidade de conciliar o desenvolvimento de comunidades ribeirinhas, indústrias ou qualquer atividade econômica que dependa da água dos rios, sem que os afete negativamente.

O estudo de Cutrim et al. (2014) descreve que, atrelado à expansão portuária, a vazão ecológica também é fator limitante para o deslocamento de embarcações em canais específicos em períodos de seca, como no Rio Mearim, onde já foram realizadas obras de dragagem após o assoreamento do rio. Para contornar o problema, deve haver uma margem de segurança de vazões para que, juntamente a isso, seja possível estabelecer uma classificação do porte de embarcações capazes de transitar independentemente do nível de reserva hídrica.

A margem de segurança a ser determinada baseia-se na legislação atual, que tem como referência a vazão Q_{90} . O modelo regional da vazão mínima de referência Q_{90} revela-se adequado para a bacia hidrográfica do Rio Mearim, sendo indicado o seu uso, apresentando bons resultados nos testes de desempenho realizados (MELLO et al. 2020). Além disso, as vazões de outorga devem garantir que uma vazão mínima se mantenha presente com alto grau de permanência.

Além da ausência de valores consistentes de vazões de referência $Q_{7,10}$ para muitos rios e foz de bacias que banham o Maranhão, também não há uma explicação concreta do agente causador das secas na região. Conjuntamente, a pouca exploração do estudo da expansão portuária na região alerta para a indispensabilidade de se relacionar os impactos dos eventos extremos de seca nas perspectivas de expansão portuária.

Outrossim, o aumento da ocorrência de períodos de seca grave chama atenção para uma vazão ecológica diferente do habitual, já que os períodos de escassez hídrica se tornam mais frequentes, alterando o cálculo da vazão $Q_{7,10}$ por exemplo. Diante disso, os valores de vazões ecológicas devem seguir padrão decrescente para os mesmos pontos quando é usado uma série histórica mais limitada.

A determinação de valores de vazões de referência atualizados e bem fundamentados junto à um estudo da sua relação com eventos de seca extrema é, portanto, necessário para uma melhor compreensão dos fenômenos, auxiliando também na proposição de métodos para lidar com a variação cada vez mais constante dos regimes de seca e com a expansão portuária local.

Os eventos extremos de seca provocam a diminuição das vazões, diminuindo a contribuição da bacia de drenagem no estuário, e isso faz com que a água do mar seja predominante no ambiente e altere a salinidade local, influenciando na migração de espécies dulcícolas e marinhas.

Há também o fator físico da alteração da salinidade da água, que implica, por exemplo, na mudança de intensidade da força de empuxo atuando em navios, e isso desloca as linhas de medição de carga durante o processo de arqueação. Nesse caso, é preciso considerar esse fator para um melhor desempenho das atividades de arqueação bem como a acurácia dos resultados, evitando possíveis problemas no carregamento dessas embarcações e na aferição do peso total da carga transportada.

Adicionalmente, as dragagens constantes também implicam na variação da salinidade local (REZENDE, 2019) e, por isso, também devem ser estudadas como fator de influência nas medições e nos impactos das fiscalizações. Clementino (2017) diz que, no Brasil e em especial no Maranhão, os estudos da atividade portuária mostram-se escassos, com perspectivas de crescimento limitados por fatores espaciais e culturais. Desse modo, um estudo detalhado do regime de vazões ecológicas em períodos de seca extrema auxilia na solução do desafio de integração do sistema porto-cidade, além de propor estratégias de expansão da zona portuária atrelado às mudanças climáticas, permitindo a tomada de decisões que reduzam os impactos negativos do desenvolvimento do setor portuário no meio ambiente.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

A relação entre o regime de precipitações no nordeste brasileiro e as variações do Índice Oceânico Niño (ION), estudada por Marengo et al. (2018) e Menezes (2021), evidencia uma forte ligação entre as secas e a variação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM).

2.1 Objetivo Geral

Determinar as vazões ecológicas para as principais bacias hidrográficas do estado do Maranhão e estudar sua relação, em eventos de seca extrema, com o fenômeno ENSO a fim de obter dados que permitam propor estratégias para lidar com os regimes de déficit hídrico na região portuária.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar vazões ecológicas para as sub-bacias abrangidas pelo território do estado do Maranhão, levando em conta períodos de seca extrema;
- Estudar a relação entre as vazões das sub-bacias do maranhão e o fenômeno ENSO;
- Estudar o comportamento das vazões ecológicas face aos períodos de seca extrema;
- Criar ferramentas e estudo, como curvas-chave, curvas de permanência, e vazões Q_{90} e Q_{95} ;
- Calcular as vazões outorgáveis para as principais regiões estudadas;
- Estudar o comportamento da vazão no ambiente estuarino face à influência da maré.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aquisição dos dados

Os dados de vazão de diversos rios maranhenses foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), o HIDROWEB v3.2.7, sendo este um portal que compõe o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). A ANA disponibiliza em seu Manual de Levantamentos Topobatimétricos e Geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RNH), escrito em parceria com o CPRM (Serviço Geológico do Brasil), uma explicação sobre a coleta de dados.

O processo consiste inicialmente na definição de uma seção transversal de um rio com um eixo perpendicular às margens. A área é definida por meio de sucessivas medidas de cota na linha de corte do perfil, utilizando uma trena ou corda graduada. Feito isso, de acordo com o porte do rio, pode ser usado um velocímetro acústico doppler (ADV) para medir a velocidade das partículas, estimando a vazão, ou um perfilador de correntes acústico doppler (ADCP) para rios com seções grandes. Os dados são correlacionados com as cotas observadas no mesmo momento da medição das vazões, gerando uma base para elaboração de uma curva-chave daquele ponto no rio. A partir disso, sucessivas medições de cotas são feitas e a vazão é estimada por meio da curva-chave, dispensando o uso de equipamentos de alto custo de aquisição, utilização e manutenção.

As estações utilizadas neste estudo estão listadas na Tabela 2, e as estações localizadas nos rios com influência direta no CESM estão ilustradas na Figura 4.

Local	Cód. Estação	Latitude	Longitude	Distância até a foz (km)	Observações
Grajaú	33380000	-3,7722	-45,2181	90,7	Deságua no Mearim
Gurupi	32620000	-1,8006	-46,3161	100	
Itapecuru	33630000	-4,1258	-44,1297	195	
Mearim (Bacabal)	33290000	-4,2194	-44,7653	350,7	
Mearim (Barra do Corda)	33250000	-5,5006	-45,2436	682,5	Trecho antes de Bacabal
Parnaíba	34879500	-3,4539	-42,37	135	
Pindaré	33190000	-3,6597	-45,4661	220	Deságua no Mearim

Tabela 2: Estações do sistema HIDROWEB utilizadas. Fonte: HIDROWEB.

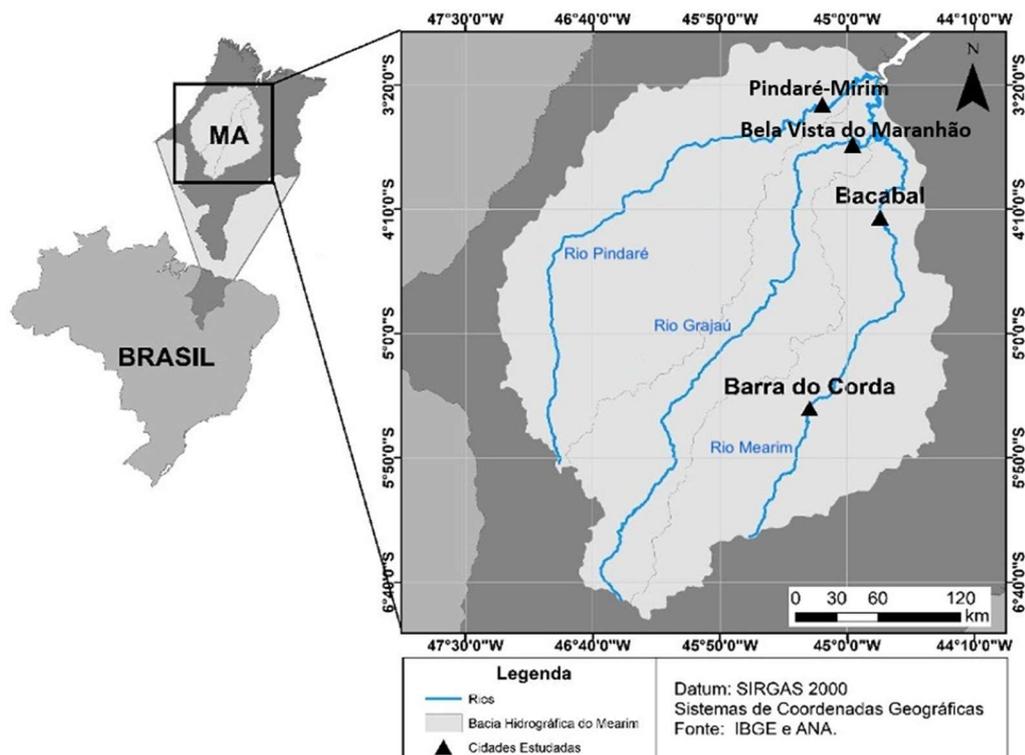


Figura 4: Estações fluviométricas presentes em rios com influência direta no CESM. Fonte: Autoral

Os dados de precipitação foram obtidos com base nas informações fornecidas pela *Climate Research Unit* (CRU) com a utilização de um plugin de distribuição pública aplicado ao software Google Earth. A partir da delimitação espacial das bacias com influência direta nas vazões foram demarcadas as malhas de 5° x 5° latitude e longitude e, posteriormente, foram divididas em malhas de 0,5° de latitude e longitude (Fig.5), proporcionando maior precisão nos dados utilizados, se mantendo coerente com os pontos onde existem estações de coleta de dados de vazão. O plugin utiliza um modelo computacional que promove a interpolação dos dados de precipitação coletados por estações automáticas distribuídas na malha selecionada e estima com precisão a precipitação na área delimitada (Harris et al. 2020).

Harris (2020) explica a metodologia de interpolação utilizada pela CRU em sua análise multivariada do banco de dados:

O processo de interpolação implementa ponderação de distância angular. As tabelas de consulta das estações são usadas para alocar coeficientes de uma estação a uma malha que, para cada intervalo de tempo e célula mensal, armazena os oito ou menos coeficientes de estações mais próximas dentro do intervalo de distância de decaimento de correlação. Os coeficientes são calculados com base em uma média histórica das estações, no período de 1961-1990. Uma vez feitas todas as alocações,

os pesos de distância e separação (angular) são calculados e usados para obter um valor de coeficiente interpolado para cada célula da malha. A elevação não é especificamente incluída na interpolação; é introduzida através das climatologias locais quando os coeficientes da malha são convertidos em valores absolutos.

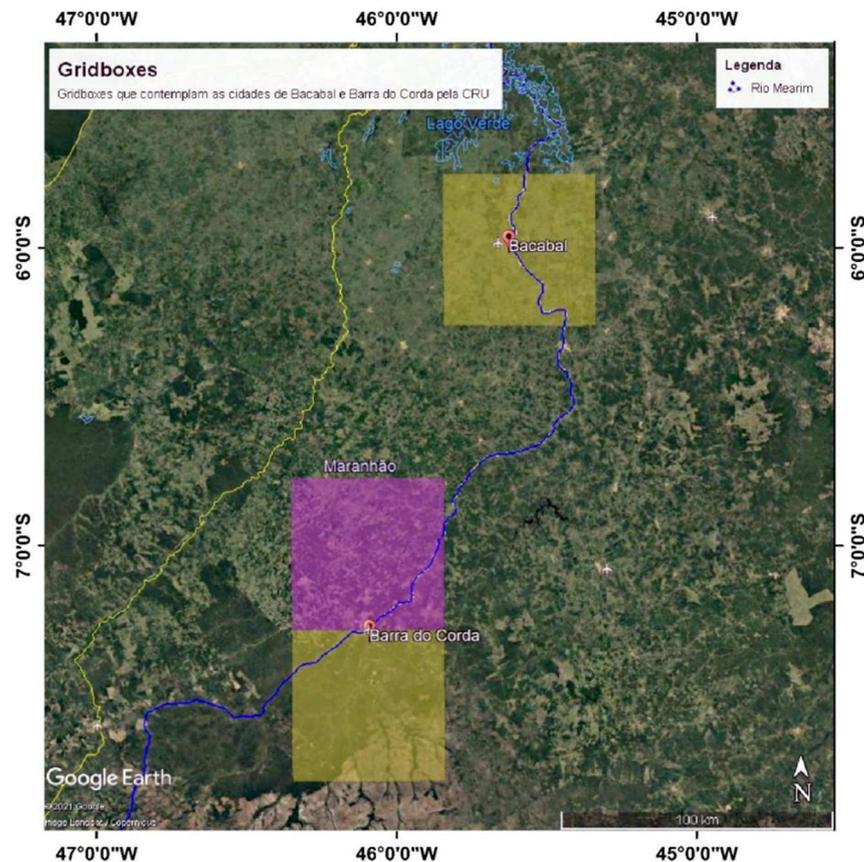


Figura 5: Malha espacial utilizada para delimitar a área dos dados de precipitação próximo as estações de coleta de dados de vazão, no Rio Mearim. Fonte: Autoral.

O estudo da real precisão dos dados fornecidos pela CRU já foi posto em prática por Menezes (2021), apresentando bom índice de correlação comparado a agências confiáveis, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a Agência Nacional de Águas (ANA). A escolha do uso da CRU se justifica pela sua maior abrangência espacial e confiabilidade ao oferecer dados baseados em áreas e não em pontos isolados de estações de coleta, evitando microclimas.

Buscando classificar a intensidade do fenômeno *El Niño Southern Oscillation* foi acompanhada a variação do Índice Oceânico Niño (ION), fornecido pela NOAA (National

Oceanic and Atmospheric Administration). O índice monitora períodos quentes e frios com base em um limite de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ - utilizando a média móvel de 3 meses consecutivos de anomalias de temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 (Fig.6) - com base em períodos base de 30 anos atualizados a cada 5 anos. Os valores são coletados por meio de flutuadores autônomos, bóias ancoradas, navios e outros meios de captação de dados. Quando o ION é maior que 0,5 ($\text{ION} \geq 0,5$), é classificado como condição de El Niño, indicando que as águas do Pacífico tropical centro-leste estão significativamente mais quentes do que a média histórica, e para valores menores que 0,5 ($\text{ION} \leq -0,5$) a classificação de La Niña é dada, indicando o oposto.

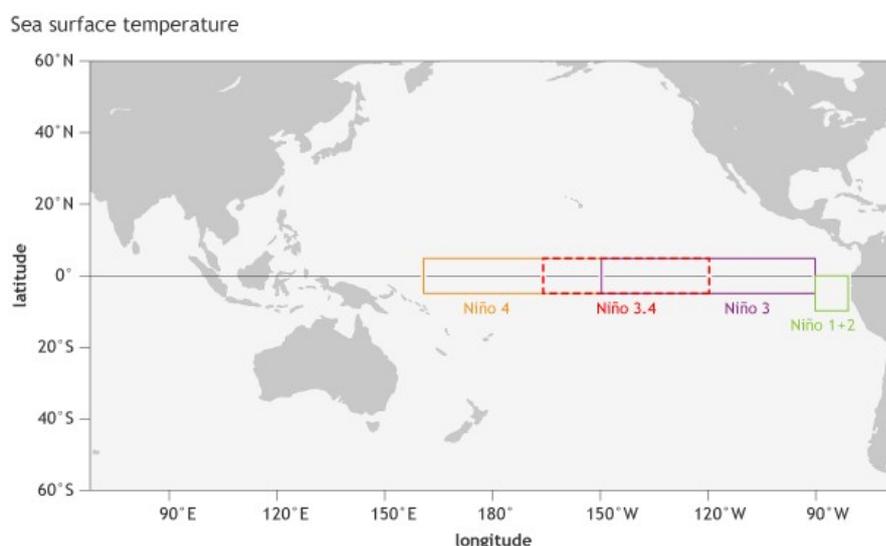


Figura 6: Ilustração da região Niño 3.4. Fonte: Lindsey, 2009

Para os dados de vazão referentes ao Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), foram usadas medições autorais, feitas em estudos anteriores, usando o equipamento ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) SonTek 500Khz, na Baía de São Marcos, pós processados com os softwares ViewADP e MATLAB utilizando filtros de *bottom track* e desprezando a camada superficial contida na célula de 0,5m de profundidade.

O ADCP é um instrumento hidro-acústico utilizado para medir a velocidade das correntes oceânicas e fluviais, operando com base no efeito Doppler. O princípio do ADCP envolve a transmissão de pulsos de som em direção ao fundo do corpo d'água e a detecção do eco desses pulsos refletidos pelas partículas em suspensão na água.

O equipamento consiste em transdutores que emitem e recebem os pulsos sonoros. Esses transdutores são montados em uma estrutura submersa, e os pulsos sonoros são

emitidos em diferentes direções, cobrindo uma ampla área de medição. Quando os pulsos encontram partículas em movimento na água, ocorre um desvio na frequência do eco refletido, devido ao efeito Doppler (equação 1). A frequência desviada permite calcular a velocidade e a direção das correntes em diferentes profundidades e locais.

$$\Delta f = \frac{2f_0 v}{c} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Δf = desvio de frequência;

f_0 = frequência da onda sonora emitida pelo ADCP;

v = velocidade da partícula em movimento;

c = velocidade do som na água.

Os dados são resultados de 4 seções (Fig. 7) distribuídas em trechos onde existem diferentes comportamentos hidrodinâmicos.



Figura 7: Mapa das seções utilizadas. Fonte: Autoral.

Os dados das seções 01 e 03 foram coletados durante o período de enchente da maré, com durações de coleta de 1h e 2h, respectivamente, enquanto a na seção 02 foi feita na maré vazante, com duração de 1h e na seção 04 foi feita durante o período de transição das marés, compreendendo o período preamar durante aproximadamente 2h, conforme Figura 8.

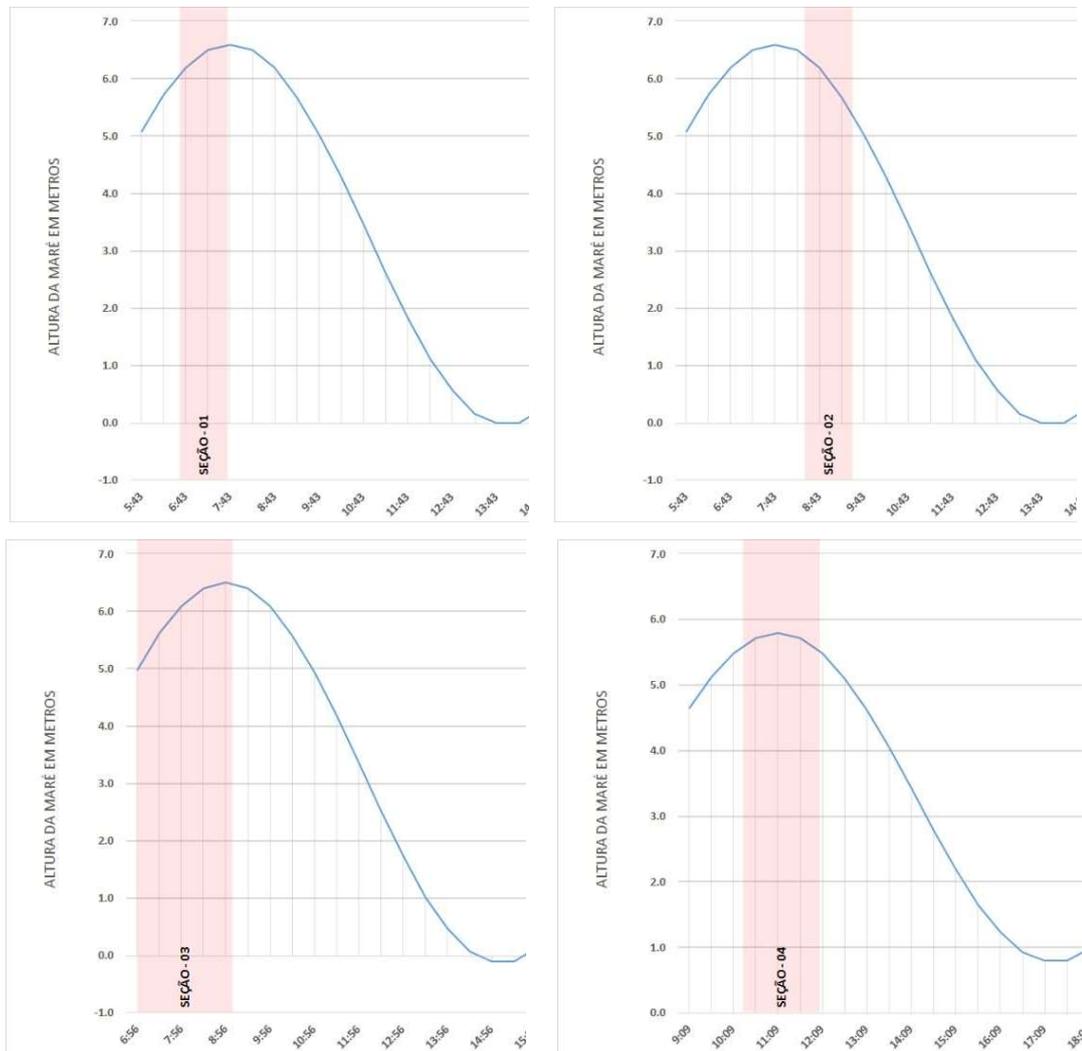


Figura 8: Gráfico Altura x Tempo para a coleta das seções 01, 02, 03 e 04. Fonte: Autoral

O comportamento da maré durante as coletas influencia no fluxo da vazão e, por isso, este estudo concentra-se na seção 02, em regime de vazante. Dessa forma o sentido da vazão do rio é preservado e os estudos são mais consistentes.

3.2 Vazões ecológicas

No caso dos rios, onde os dados de vazão já foram obtidos via banco de dados da ANA, o processamento dos dados para determinação da vazão ecológica para os pontos escolhidos foi feito com o uso da distribuição de probabilidade para valores extremos de

Gumbel, usada por Pinto et al. (2010), entre outros autores, como uma equação de grande confiabilidade para este fim, a fim de encontrar como valor de referência a vazão $Q_{7,10}$.

A distribuição de Gumbel para valores extremos (mínimos) é uma distribuição normalmente aplicada em séries anuais para estudar-se os valores mínimos apresentados e que tenham relação com determinado fenômeno.

Esta é definida pela Equação 2:

$$P = 1 - e^{-e^{-b}} \quad \text{Equação 2}$$

$$\text{Onde: } b = \frac{1}{0,7797 \cdot S} \cdot (x - \bar{x} - 0,45 \cdot S)$$

Porém, partindo de um P (Tempo de Retorno) igual a 10 anos, é possível manipular a fórmula para encontrar o x (vazão mínima de 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos). Desse modo, obtém-se então:

$$x = \bar{x} + s \cdot \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[\ln \left(\frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right\} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

x = Vazão mínima de 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos

\bar{x} = Média das vazões mínimas anuais

s = Desvio padrão amostral

TR = P = Tempo de retorno

Além disso, a partir dos dados coletados e construídos serão desenvolvidas mais ferramentas de estudo, como curvas de permanência, capazes de expressar a permanência dos valores de vazões estudados em função da série histórica adotada, e curvas-chave, que buscam criar equações que descrevam a variação de vazão em função das cotas do rio.

As equações da curva-chave são descritas por uma equação fruto da interpolação da nuvem de dados existente, correlacionando valores de cota e vazão medidos no mesmo momento. Em posse desses dados é feita uma regressão linear por meio do método dos mínimos quadrados que é então transformada em uma função polinomial de grau superior por meio de uma mudança de variável. Ou seja, para uma função polinomial de grau n representada por $y = a_n * x^n + \dots + a_2 * x^2 + a_1 * x + b$ é feita uma mudança tal qual $X_i = x^i$, permitindo uma regressão linear do tipo $y = a_n * X_n + \dots + a_2 * X_2 + a_1 * X_1 + b$ de modo que a variável y não dependa de uma variável x em n diferentes graus, mas de n diferentes variáveis X_i independentes.

As curvas-chave terão como parâmetro de confiabilidade o coeficiente de determinação R-quadrado. Portanto, serve de medida de ajuste para um modelo estatístico, sendo $0 < R^2 \leq 1$:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

SQ_{res} = Soma dos Quadrados dos Resíduos;

SQ_{tot} = Soma Total dos Quadrados.

Definidos por:

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Equação 5}$$

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

y_i = Valor observado;

\bar{y} = Média das observações;

\hat{y}_i = Valor estimado.

Outra ferramenta é a curva de permanência, que consiste na classificação em ordem crescente das vazões observadas em uma série histórica seguida da distribuição de probabilidade de ocorrência ou superação daquele valor, variando de 100% até 0%. Ou seja, para a menor vazão observada na série histórica a permanência será de 100%, pois durante o estudo todas as vazões foram iguais ou superiores. Naturalmente, a maior vazão observada terá permanência de 0% considerando que nunca foi igualada ou superada.

Com base na revisão da legislação local, foi feito um levantamento mais sólido dos valores de vazões outorgáveis baseadas em vazões de referência, como a Q_{90} e a Q_{95} , possibilitando um estudo a respeito do crescimento das atividades econômicas que dependem do rio. Essas vazões apresentam permanência mínima de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}), ou seja, a descarga líquida presente no sistema por 90% ou 95% do tempo. Para obtê-las, são calculadas as vazões cuja probabilidade de ser igualada ou superada seja igual à permanência buscada, utilizando uma distribuição simples de todos os valores presentes na série histórica, conseqüentemente gerando uma ferramenta para elaboração da curva de permanência.

3.3 Volume de água doce

As vazões reais dos trechos cujos dados provém do ADCP foram calculadas com base no produto entre as áreas normalizadas dos cortes transversais das seções e a média das velocidades das partículas transportadas. Os valores foram obtidos via software de processamento.

Além disso, tendo em vista que o estuário é um ambiente cuja composição da água consiste em uma mistura de água do mar e água doce, é importante encontrar o volume de água doce para criar uma caracterização da salinidade local. Para isso, com base no estudo de Dias et al. (2016), inicialmente foi encontrado o Volume de Transporte (V_T) nas seções perpendiculares ao fluxo na área $A=A(x,Z)$ definido por meio da equação 7:

$$V_T = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{A} \iint_A \vec{v} \cdot \vec{N} dA \right] dt \quad \text{Equação 7}$$

Onde $\vec{v} = \vec{v}(x, Z, t)$ é o vetor velocidade, \vec{N} o versor normal para a seção A, T é o período de um ciclo de maré completo, x é a distância horizontal da seção e Z é a profundidade.

Posteriormente, para encontrar o tamanho do prisma de maré (PM), foi utilizado o modelo de Officer (1976) que define o prisma de maré conforme equação 7:

$$P_M = \int_0^{\Delta t} T_V dt \quad \text{Equação 8}$$

Por fim, aplicou-se a equação 8 para encontrar o percentual de água doce no estuário (V_{ad}) por meio da razão entre a vazão do Rio Mearim (Q_r) e o prisma de maré (PM):

$$P_{ad} = \frac{Q_r}{P_M} \quad \text{Equação 9}$$

3.4 Cruzamento de dados

Ao relacionar os IONs com dados de vazão e precipitação é possível estudar a influência do ENSO nas secas do nordeste brasileiro (Marengo et al. 2018; Cunha et al. 2019).

Em posse dos dados de vazão ecológica e da relação entre o ION e o regime de vazões, foi feita uma análise de comportamento das vazões ecológicas em períodos de seca extrema e um estudo conjugando os dados das vazões dos rios com as medições realizadas com o ADCP, buscando calcular a influência da água do mar sobre a vazão dos rios na Baía de São Marcos.

No estudo foram analisados os rios de maior contribuição no estado, incluindo os que marcam a divisa com os estados do Pará e Piauí: Gurupi e Parnaíba, respectivamente. A lista completa é formada por:

- Rio Grajaú;
- Rio Gurupi;
- Rio Itapecuru;
- Rio Mearim;
- Rio Parnaíba;
- Rio Pindaré;

O cruzamento foi feito inicialmente com a variação dos valores mínimos anuais de vazão medidos em cada rio, comparados com a variação do ION, investigando a ocorrência de padrões entre os dados e anomalias que indiquem uma relação oposta ao padrão esperado e já confirmado pela comunidade científica.

Com foco no Complexo Estuarino de São Marcos, os dados dos Rios Mearim, Grajaú e Pindaré foram compilados para calcular a diferença entre a vazão indicada pela régua da ANA com base em uma média histórica de 20 anos, e a vazão na foz, utilizando os dados coletados pelo ADCP em 2017.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo permitiu determinar valores atualizados e concretos das vazões de outorga e vazões de referência para a região, de fundamental importância para diversos estudos hidrológicos. Com base nisso, os novos parâmetros de análise permitirão entender mais sobre a dinâmica do local, facilitando a tomada de decisões e a aplicação dos valores em estudos e modelagens futuras.

Para os rios estudados, foram encontrados os seguintes valores de vazões ecológicas $Q_{7,10}$, Q_{90} , e Q_{95} (Tabela 3):

Local	Q7,10 (m ³ /s)	Q90 (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)
Grajaú	0,5	4,75	3,01
Gurupi	70,84	123,12	104,76
Itapecuru	24,9	37,15	32,2
Mearim (Bacabal)	30,36	38,79	34,79
Mearim (Barra do Corda)	27,28	33,47	29,6
Parnaíba	244,86	287,64	269,77
Pindaré	13,28	26,83	15,67

Tabela 3: Vazões de referência $Q_{7,10}$; Q_{90} ; Q_{95} para os rios estudados. Fonte: Autoral

Observa-se que as maiores vazões ecológicas foram encontradas nos rios Gurupi e Parnaíba que, conforme citado anteriormente, delimitam o território do estado do Maranhão, marcando a divisa com os estados do Pará e Piauí, respectivamente.

Além das vazões ecológicas, o tratamento dos dados levou à elaboração de curvas-chave para os rios estudados. Em algumas nuvens de dados foi possível enxergar curvaturas que prejudicam a interpolação, de modo que alguns pontos afetam negativamente o coeficiente de determinação R-quadrado. Nestes casos a função foi tratada como não-linear a fim de simplificar os cálculos durante sua utilização, diminuindo o grau polinomial da interpolação.

Para o Rio Mearim (Bacabal), por exemplo, utilizando apenas uma função, foram encontrados pontos com baixa adesão à curva, como ilustrado na Figura 9.

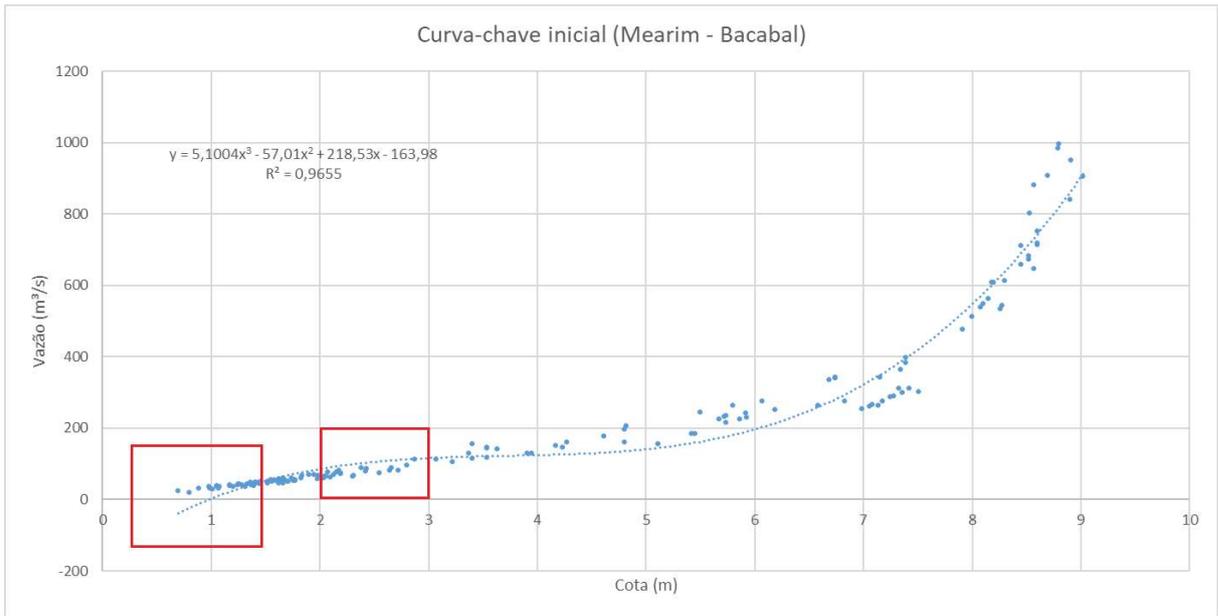


Figura 9: Curva-chave sem ajuste para o Rio Mearim, mostrando a baixa adesão dos dados à curva (retângulos vermelhos). Fonte: Autoral.

Ao observar o problema foi feito um ajuste (Figura 10) para utilização de uma função não linear. Assim tem-se:

$$f(c) = \begin{cases} 0,4779c^2 + 35,335c - 5,6042; & \text{se } c \leq 5,5\text{m} \\ 101,23c^2 - 1276,3c + 4250,6; & \text{se } c > 5,5\text{m} \end{cases}$$

Onde:

c = cota (m)

$f(c) = q$ = Vazão (m³/s)

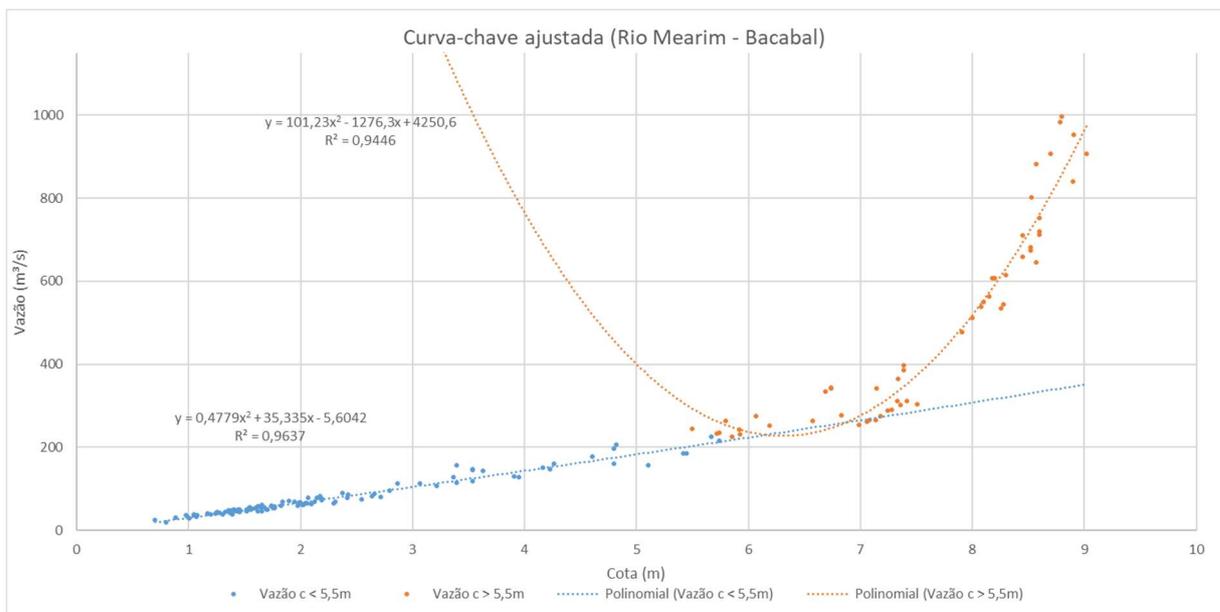


Figura 10: Curva-chave ajustada para o Rio Mearim, com melhor adesão dos dados às curvas polinomiais. Fonte: Autoral.

Já para o Rio Grajaú (Figura 11), não houve necessidade de utilizar uma função não-linear pois uma contínua já apresentou com coeficiente de determinação, além de garantir a boa aderência dos pontos.

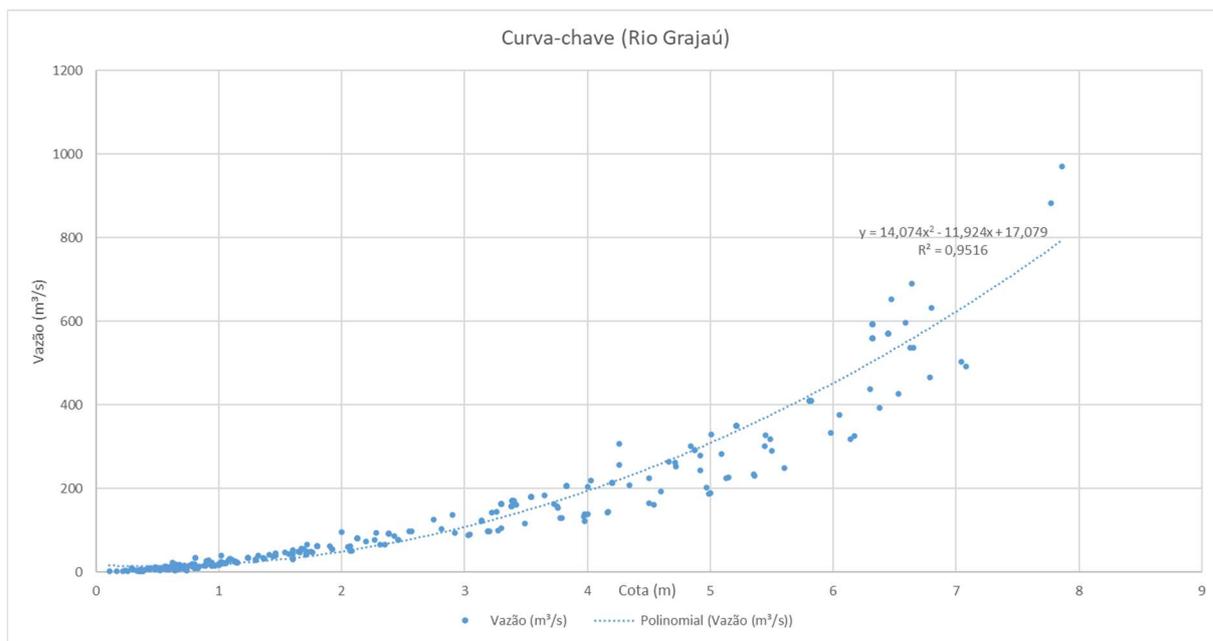


Figura 11: Curva-chave para o Rio Grajaú, mostrando que a função polinomial adotada se distribui de forma satisfatória sobre a nuvem de dados existente. Fonte: Autoral.

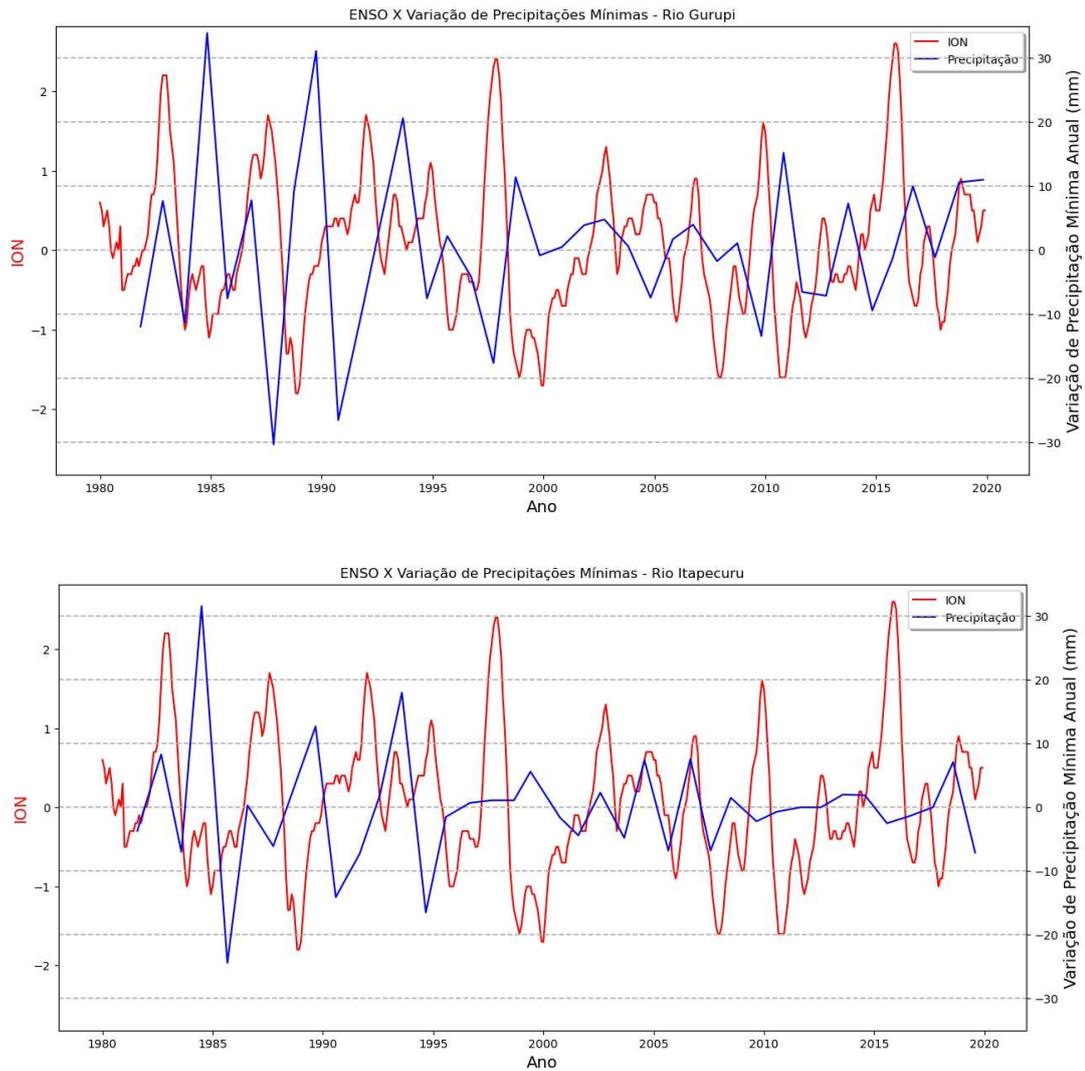
As equações das curvas-chave estão representadas na Tabela 4, enquanto o restante dos gráficos está disposto no **Apêndice I**.

Local	Cód. Estação	Curva-chave	R ²	Domínio
Grajaú	33380000	$f(c) = 14,074c^2 - 11,924c + 17,079$	0,9516	$\forall c \in \mathbb{R}^+$
Gurupi	32620000	$f(c) = 19,881c^2 + 27,712c + 6,7142$	0,9871	$\forall c \in \mathbb{R}^+$
Itapecuru	33630000	$f(c) = 15,472c^2 - 22,691c + 42,944$	0,9941	$\forall c \in \mathbb{R}^+$
Mearim	33290000	$f(c) = 0,4779c^2 + 35,335c - 5,6042$	0,9637	$0 < c \leq 5,5\text{m}$
Mearim	33290000	$f(c) = 101,23c^2 - 1276,3c + 4250,6$	0,9446	$c > 5,5\text{m}$
Parnaíba	34879500	$f(c) = 67,889c^2 + 28,187c + 151,62$	0,9767	$\forall c \in \mathbb{R}^+$
Pindaré	33190000	$f(c) = 2,3036c^2 + 22,542c - 9,9786$	0,8805	$0 < c \leq 5,4\text{m}$
Pindaré	33190000	$f(c) = 62,412c^2 - 627,4c + 1813,1$	0,8193	$c > 5,4\text{m}$

Tabela 4: Equações da curva-chave para as estações estudadas. Fonte: Autoral.

Com a aplicação da estratégia de separação das curvas de acordo com a cotas foi possível alcançar coeficientes de determinação bem consistentes, exceto para o Rio Pindaré que naturalmente apresenta uma nuvem de dados com pouca tendência de uniformidade.

Ao realizar uma busca para identificar um possível padrão que indique relação entre as variações do ION e a ocorrência de períodos de seca na região nordeste do Brasil, foram obtidos gráficos (Figura 10) que apresentam o padrão de oscilação inversa entre a variação do ION e a incidência mínima de precipitação na foz do Rio Gurupi, Itapecuru e Parnaíba, acrescentando robustez aos dados já estudados para trechos do Rio Mearim - em Bacabal e Barra do Corda por MENEZES (2021).



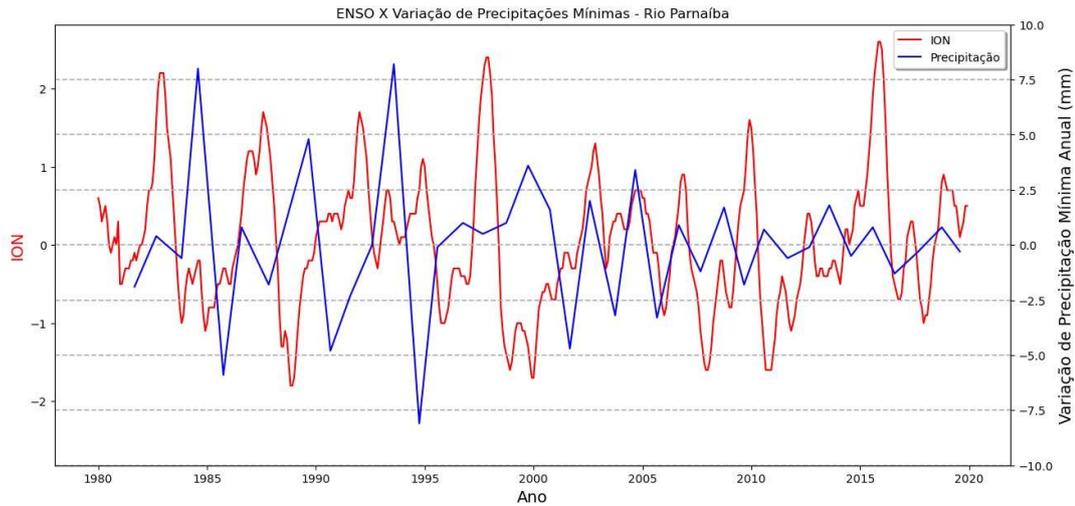


Figura 12: Gráficos de comparação ENSO x Variação de Precipitações Mínimas para os rios Gurupi, Itapecuru e Parnaíba. Fonte: Autoral.

Na Baía de São Marcos, onde foi estudado o comportamento das águas marítimas face às vazões provenientes da Bacia do Rio Mearim, foram obtidos com precisão a real vazão na foz da bacia, como mostra a Tabela 05.

Seção	Vazão (m ³ /s)	Vel. Média (m/s)	Vel. Máxima (m/s)	Vel. Mínima (m/s)	Transporte Total (m ³)
Seção 02	$9,444 \times 10^2$	0,0536	1,9190	0,0070	$2,3281 \times 10^3$

Tabela 5: Componentes básicas adquiridas na seção 02; Fonte: Autoral

Os dados possibilitaram uma análise da correlação entre o valor medido nas estações e o valor real medido com o ADCP, e apresentam uma divergência de valores, revelando a necessidade de uma justificativa para o consumo de água desde a estação fluviométrica até o ponto de coleta de dados com o ADCP.

Utilizando índices de salinidade de 36,2 g/kg para o mar (água tropical) e 33,5 g/kg para a região do CESM (para 2017) foi possível calcular a proporção de água doce no estuário e estimar a divergência entre os dados da estação da ANA mais próxima.

Considerando que a vazão esperada na foz é a soma dos três rios de maior contribuição, é coerente trabalhar apenas com os rios que possuem influência direta no estuário, sendo eles os Rios Grajaú, Mearim e Pindaré, com vazões médias de 173,20; 149,32 e 309,32 m³/s, totalizando uma vazão de 651,85m³/s.

A razão entre a vazão calculada no estuário e a vazão das estações mais próximas nos rios Grajaú, Mearim e Pindaré apresentou uma proporção de apenas 10% no CESM, conforme

apresentado na Tabela 6. Ou seja, a vazão medida na seção 2 representa uma parcela aproximadamente 10 vezes menos que a obtida nos dados da ANA.

SEÇÃO 02		
Vazante	Vazão ADCP (Q)	944,40 m ³ /s
	Volume Total (V = Q x T)	3.399.840,00 m ³
	Vol. de Água Doce	253.579,23 m ³
	% Água Doce	7,46%
	Tempo de Retorno	268,51 S
	Vazão das estações - Q_{ANA}	651,85 m ³ /s
	Vazão medida - Q_{medida} (água doce)	70,44 m ³ /s
	Proporção (Q_{medida}/Q_{ANA})	10,81%

Tabela 6: Dados obtidos pela relação entre dados e ADCP e da ANA para a seção 02. Fonte: Autoral.

A grande diferença obtida pode ser causada por diversos fatores, desde interferências antrópicas (agricultura, pecuária ou outorga para uso humano) quanto o comportamento da maré no estuário.

Além disso, comparando a área da seção traçada pelo ADCP com a área da seção compreendida nas estações fluviométricas é possível observar uma diferença robusta, conforme apresentados nas tabelas 7 e 8.

Local	Cód. Estação	Área da seção (m ²)	Largura média (m)	Vel. Média (m/s)
Grajaú	33380000	213,16	87,01	0,57
Mearim	33290000	257,01	69,13	0,64
Pindaré	33190000	585,44	178,12	0,36
TOTAL	-	1.055,61		1,57

Tabela 7: Área das seções abrangidas pelas estações fluviométricas estudadas. Fonte: Autoral.

Seção	Área (m ²)	Velocidade média (m/s)	Vazão (m ³ /s)
Seção 2	17.619,40	0,0536	944,40

Tabela 8: Área da seção do ADCP. Fonte: Autoral.

A área das seções somadas resulta em 1.055,62m². Este valor representa aproximadamente 6% da área da seção 2. A área das seções e as velocidades média seguem um padrão inversamente proporcional ao comparar com os valores do ADCP. Apesar de a área da seção na seção 2 ser aproximadamente 17 vezes maior, a velocidade é consideravelmente menor.

Na busca pela justificativa da divergência de vazão é possível dividir as influências em antrópicas (abordando a interferência humana e seus impactos na variação da vazão do rio) e naturais (ao explorar os impactos do regime de maré no ambiente estuarino).

4.1 – Ações antrópicas

Crescimento populacional: O aumento da população ao longo das margens do rio Mearim pode levar a uma maior demanda por água para consumo humano, agrícola e industrial, resultando em pressão sobre a vazão do rio. Após as estações fluviométricas utilizadas, apenas as cidades de Vitória do Mearim, com população de 30.805 pessoas (IBGE 2022) e Arari, com população de 29.472 pessoas (IBGE 2022) apresentam porte e posição favorável para desvio da vazão do rio. Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de Arari (2018), o sistema de adução de água da cidade utiliza uma captação contínua de 300 l/s (0,3m³/s) para abastecimento da cidade, o que não gera grande impacto no regime do Rio Mearim. Apesar de a cidade de Vitória do Mearim não ter um Plano Municipal de Saneamento Básico, é plausível considerar um valor de adução similar devido à proporção entre as populações.

Desenvolvimento econômico: O crescimento econômico da região pode aumentar a demanda por água para atividades industriais, de mineração, agricultura irrigada e geração de energia, afetando a vazão do rio, entretanto, na região estudada não existe forte presença de atividade industrial. A agricultura tem maior representatividade na região do médio e alto mearim. Segundo o Relatório de Zoneamento Agrícola da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim (2015), Arari e Vitória do Mearim são as maiores produtoras de melancia do estado, além de possuir grande representatividade na produção de melancia. Outros frutos também são destaques nestas cidades, como limão e tomates. Apesar da pouca adesão do baixo Mearim à pecuária, a cidade de Vitória do Mearim está entre as que possui o maior rebanho de bubalinos, chegando em torno de 2000 cabeças.

4.2 – Ações naturais

O ambiente estuarino é composto por uma zona de mistura entre a água fluvial e marítima, onde ocorrem diversos processos importantes e complexos. O livro “An Introduction to the Chemistry of the sea (Pilson 1998) apresenta alguns processos que incidem na região, conforme elencado:

- Mistura de águas: A diferença de salinidade das águas faz com que a água doce tenda a flutuar sobre a água salgada, resultando em uma zona de mistura onde as duas águas se combinam gradualmente. A pressão hidrostática da água do mar desempenha um papel importante nesse processo, ajudando a misturar as duas massas de água ao atuar como barreira no sentido contrário ao deslocamento da água do rio.
- Circulação estuarina: A pressão da água do mar também influencia os padrões de circulação dentro do estuário. A diferença de densidade entre a água doce e a água salgada pode gerar fluxos de entrada e saída de água do estuário, conhecidos como correntes de maré. Essas correntes são impulsionadas em parte pela diferença de pressão entre a água doce e a água salgada.
- Intrusão salina: Em determinadas condições, como períodos de maré alta ou baixa vazante, a pressão da água do mar pode levar à intrusão salina, onde a água salgada penetra mais profundamente no estuário, empurrando a água doce rio acima. Isso pode ter impactos significativos nos ecossistemas estuarinos e nas comunidades que dependem deles.

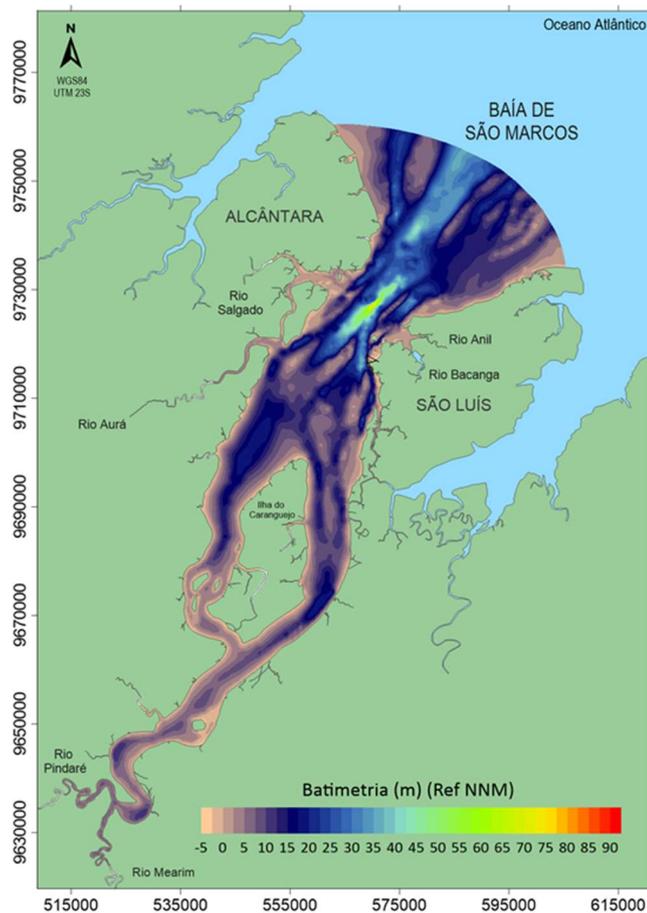


Figura 13: Batimetria do CESM. Fonte: Rosman e outros, 2018.

Adicionalmente, a batimetria presente no Relatório Descritivo da Baía de São Marcos (2018) mostra que a seção 02 está localizada no ponto de maior profundidade do CESM (Figura 11), favorecendo a pressão da água do mar sob a descarga fluvial devido à coluna d'água. Isso impacta na magnitude do vetor velocidade do rio na foz, podendo justificar a diferença entre a vazão das estações fluviométricas e a vazão medida.

A interface gerada entre as duas massas de água na camada limite estuarina gera fenômenos de mistura e interação entre as diferentes propriedades físicas e químicas das águas que, atrelado à influência do gradiente de salinidade e densidade da água doce, gera diferenças na pressão hidrostática ao logo da interface rio-mar.

Conforme previsto na equação fundamental da hidrostática, a pressão exercida pela água do mar aumenta com a profundidade mais rapidamente que a água do rio devido à maior densidade. Consequentemente, a pressão da água pode exercer pressão contra a corrente do rio, reduzindo a vazão efetiva.

O marcante comportamento da maré na região do CESM faz com que os processos de mistura e turbulência sejam intensificados nas zonas de convergência e divergência, principalmente em períodos de enchente. O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) aplicado por Santos (2019) também evidencia a diferença de velocidade das partículas na região do baixo mearim nos períodos de enchente e vazante. A velocidade do fluxo de água antes da entrada da maré correspondeu a 0,8 km/h, enquanto a velocidade de entrada da maré correspondeu a aproximadamente 42 km/h (Santos, 2019), concluindo que há uma forte influência da maré no regime de descarga fluvial, alterando diariamente as propriedades hidrológicas e físico-químicas da água nessa região.

5 CONCLUSÕES

A elaboração de curvas-chave e curvas de permanência facilita estudos em cenários com escassez de informações, permitindo a aplicação de estratégias para o gerenciamento de recursos hídricos por meio de vazões outorgáveis ou criação de modelos e caracterização dos rios estudados. As equações de curva-chave representam de forma simples o comportamento do rio e apresentaram um coeficiente de determinação satisfatório, o que traz confiabilidade para sua utilização no cotidiano.

Unindo os dados de precipitação com a variação do ION também foi possível expandir o conhecimento da relação entre o fenômeno ENSO e o regime de chuvas no nordeste brasileiro, observando que, apesar de menos marcante, o fenômeno ainda ocorre até na área de transição para o clima equatorial na região norte do país.

Os dados coletados via ADCP ampliaram o entendimento do comportamento das vazões do Complexo Estuarino de São Marcos e permitiram realizar um estudo conjugado com as vazões coletadas no banco de dados da ANA, evidenciando um grande desvio entre a vazão da ANA e a vazão medida - um valor significativo e que pode impactar nos estudos da região.

Devido à diferença de densidade por conta da salinidade, a influência da pressão hidrostática da maré sob o rio tende a alterar a magnitude do vetor velocidade do rio com frequência e, conseqüentemente, é esperada uma diferença na medição da vazão devido ao dinamismo do cenário.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Enner Herenio de. Modelagem Exploratória dos Processos de Mistura no Estuário do Rio Peria. Rbrh — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s. l], p. 137-145, 22 set. 2008.

CLEMENTINO, José. São Luís: cidade portuária em transformação: são luís: a changing port city. **Revista de Ciência & Tecnologia**, S.L., v. 21, n. 41, p. 3-14, 22 nov. 2018.

CUTRIM, Sérgio Sampaio; PARENTE, Felipe Rafael Freitas; ROBLES, Leo Tadeu; MARANHÃO, Departamento de Ciências Contábeis e Administração-Universidade Federal do. GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM UM TERMINAL PORTUÁRIO. **Tecnologia**, S.L., p. 24-36, 14 mar. 2014.

DIAS, Francisco Jose da Silva; CASTRO, Belmiro Mendes; LACERDA, Luiz Drude; MIRANDA, Luiz Bruner; MARINS, Rozane Valente. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. **Elsevier: Estuarine, Coastal and Shelf Science**. Online, p. 258-274. 2016.

EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database. Available online: <https://www.emdat.be> Acesso em: 03 abr. 2021.

FARIAS JÚNIOR, José Edson Falcão de. ANÁLISE DE METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO ECOLÓGICA. ESTUDO DE CASO: RIO CORURUPE/AL E RIO SOLIMÕES/AM. 2006. 150 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FILHO, Jarbas Bonetti; MIRANDA, Luiz Bruner de. ESTIMATIVA DA DESCARGA DE ÁGUA DOCE NO SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR DE CANANÉIA-IGUAPE. **Revista Brasileira de Oceanografia**, São Paulo, v. 810, p. 89-94, 1997.

GONDIM FILHO, Joaquim Guedes Correa. Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos do Brasil. Brasília - Df: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil)., 2024.

HARRIS, Ian; OSBORN, Timothy J.; JONES, Phil; LISTER, David. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Nature: Scientific Data*, Online, v. 109, n. 7, p. 1-18, 2020.

HARRIS, I.; JONES, P.D.; OSBORN, T.J.; LISTER, D.H.. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 623-642, 21 maio 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3711>.

LOPES, Eduardo Kayk Abreu. **VARIAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA DE 2017**. 2018. 44 f. Tese (Doutorado) - Curso de Oceanografia, Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

LOPES, Jucivan Ribeiro. **ZONEAMENTO AGRÍCOLA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEARIM**. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 2016. 151 p.

LORA, Jesus Manuel Correa. **Propriedades Geométricas de Espaços de Probabilidade**. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Matemática, Instituto de Matematica, Estatística e Computação Científica., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019

MACIEL, Samuel Alves. **ANÁLISE DA RELAÇÃO CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA, BRASIL**. 2007. 214 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln M.; ALVALA, Regina C.S; CUNHA, Ana Paula; BRITO, Sheila; MORAES, Osvaldo L.L. Climatic characteristics of the 2010- 2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, S.L., p. 90-103, maio 2017.

MENEZES, Weyder Freire Santos de. **VAZÃO ECOLÓGICA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA A BACIA DO RIO MEARIM (MA)**. 2021. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

MINFRA, Ministério da Infraestrutura. Bacia do Nordeste – Hidrovia do Mearim. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/conteudo/bacia-nordeste>. Acesso em: 3 de jan. 2022,

NING, L.; LIU, J.; WANG, B.; CHEN, K.; YAN, M.; JIN, C.; WANG, Q. Variability and mechanisms of megadroughts over eastern China during the last millennium: A model study. *Atmosphere* 2019, 10, 7.

NOAA, National Oceanic And Atmospheric Administration -. Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures. 2021. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>. Acesso em: 01 abr. 2021.

NOAA, National Oceanic And Atmospheric Administration -. El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion. 2021. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>. Acesso em: 01 abr. 2021.

NUGEO, Núcleo Geoambiental -. REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO MARANHÃO. 2021. Disponível em: https://www.nugeo.uema.br/?page_id=233. Acesso em: 18 mar. 2021.

PILSON, Michael E. Q.. An introduction to the chemistry of the sea. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2013.

REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL, 2021, Brasília - Df. **Levantamentos Topobatimétricos e Geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. Brasília - Df: Ana, 2021. 122 p.

PILSON, Michael E. Q. An Introduction to the Chemistry of the Sea. Prentice Hall, 1998.

SARMENTO, Robson. ESTADO DA ARTE DA VAZÃO ECOLÓGICA NO BRASIL E NO MUNDO. S.L: Unesco/Ana/Cbhsf, 2007. 38 p.

SANTOS, Juliana Martins dos; GOMES, Eliane dos Santos; SILVA FILHO, George Colares; LIMA, Neuriane Silva; LOPES, Monica Larissa Castro; ALMEIDA, Juliana Lopes; SILVA, Paulo Aurélio Cardoso da; VERAS, Halissa Helena dos Santos; SILVA, Fabrício Brito. CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS MARÉS NA REGIÃO DO BAIXO CURSO DO RIO MEARIM ATRAVÉS DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO. Santos - Sp: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019.

VASCONCELOS, Kellyanna da Silva; ROSMAN, Patricia Auler; ROSMAN, Paulo Cesar Colonna; NZUALO, Teodósio das Neves Milisse; ANDRADE, Verônica Silveira de. **Projeto Baías do Brasil Baía de São Marcos, Maranhão**: relatório descritivo. Relatório Descritivo. 2024. Disponível em: https://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel_baia_saomarcos.html. Acesso em: 19 fev. 2024.

WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In Drought: A global Assessment; Routledge: London, UK, 2000; pp. 3–18.

APÊNDICE I

