

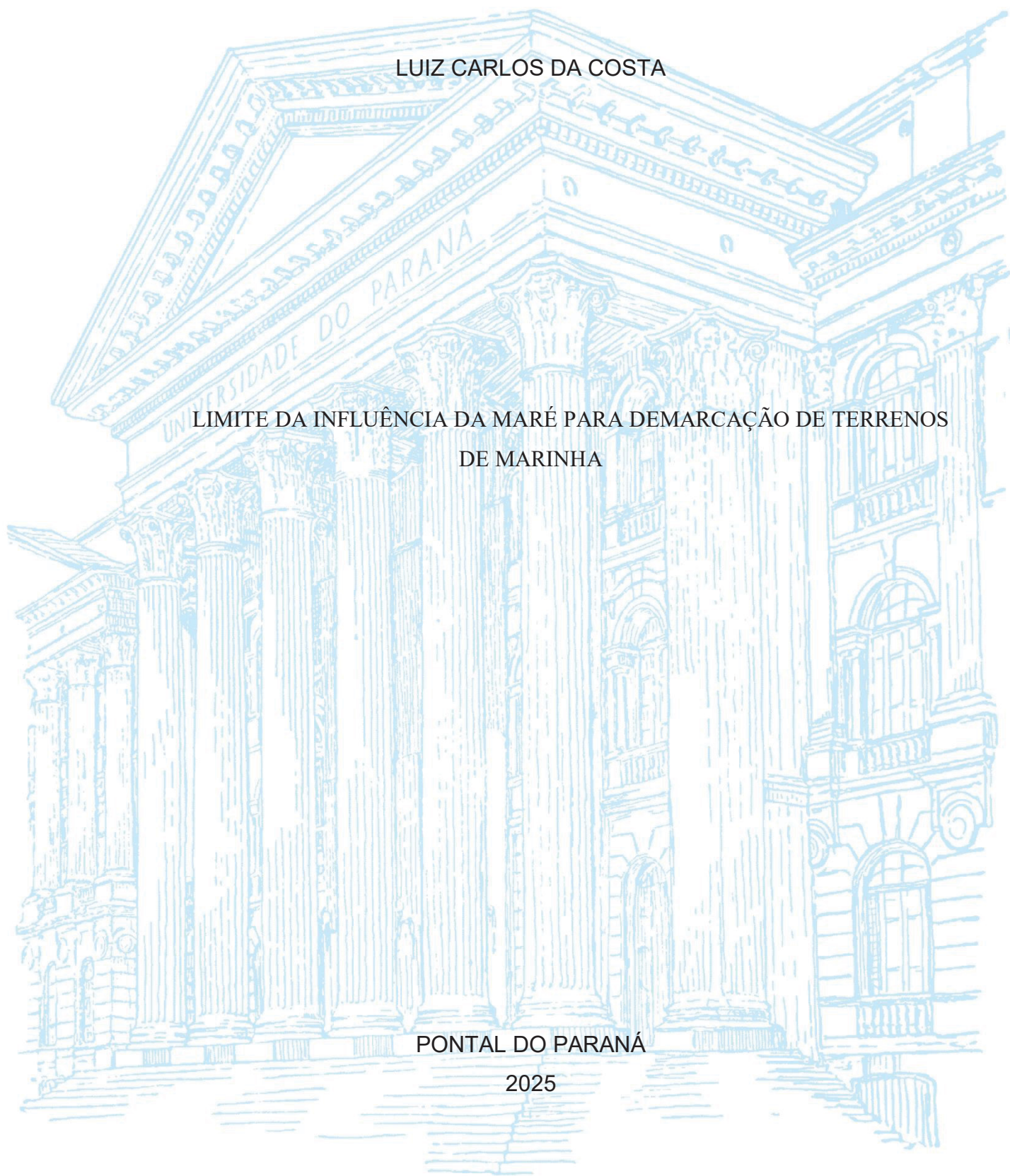
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ CARLOS DA COSTA

LIMITE DA INFLUÊNCIA DA MARÉ PARA DEMARCAÇÃO DE TERRENOS
DE MARINHA

PONTAL DO PARANÁ

2025



LUIZ CARLOS DA COSTA

LIMITE DA INFLUÊNCIA DA MARÉ
PARA DEMARCAÇÃO DE TERRENOS DE MARINHA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Campus Pontal do Paraná Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Gestão e Conservação da Zona Costeira e Oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes.

PONTAL DO PARANÁ
2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

Costa, Luiz Carlos da

Limite da influência da maré para demarcação de terrenos de marinha /
Luiz Carlos da Costa. – Pontal do Paraná, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Campus
Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Programa de Pós-Graduação
em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Bernardino Lopes

1. Mar. 2. Mares. 3. Água. 4. Movimento. 5. Terrenos de marinha. I.
Noernberg, Maurício Almeida. II. Lopes, Alexandre Bernardino. III.
Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Sistemas
Costeiros e Oceânicos. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
REITORIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PRÓ-REITORIA
DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SISTEMAS
COSTEIROS E OCEÂNICOS - 40001016054P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUIZ CARLOS DA COSTA**, intitulada: **LIMITE DA INFLUÊNCIA DA MARÉ PARA DEMARCAÇÃO DE TERRENOS DE MARINHA**, sob

orientação do Prof. Dr. MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Pontal do Paraná, 30 de Junho de 2025.

Assinatura Eletrônica

03/07/2025 11:13:00.0

MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/07/2025 09:40:17.0

EDUARDO VEDOR DE PAULA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

04/07/2025 11:23:12.0

ROBERT MARTINS DA SILVA

Avaliador Externo (FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA)

Av. Beira-Mar, s/n – Pontal do Paraná – Paraná – Brasil
CEP 83255-976 – (41) 3511-8642 – E-mail: pgsisco@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 463687.

Para autenticar este documento /assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 463687.

Dedico esse trabalho à minha amada esposa, Joseane Santos da Costa, que enfrenta tempestades com uma força que me emociona profundamente. Mesmo quando as batalhas parecem invencíveis, jamais deixa de lutar, revelando uma coragem e vitalidade que me inspiram a cada dia. Este trabalho é tão seu quanto meu, pois nada teria sido possível sem você ao meu lado.

Ao meu pai, Luiz da Costa, que na sua simplicidade, ensinou-me valores inestimáveis e cujo exemplo moldou meu caráter, preparando-me para enfrentar a vida com perseverança, dedicação, comprometimento e honra.

E ao meu filho, Pedro Henrique Santos da Costa, cuja alegria de viver, inteligência precoce e perspicácia constante, ilumina meus dias me enchem de orgulho e renovam em mim o desejo de ser sempre melhor. Que sua curiosidade nunca se apague e que o mundo lhe devolva em dobro tudo o que você me inspira.

Este trabalho é, acima de tudo, uma homenagem a vocês.

AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo só foi possível graças à colaboração, apoio e confiança de diversas pessoas e instituições, às quais registro minha mais profunda gratidão.

À minha esposa, Joseane Santos da Costa, agradeço imensamente por sua presença inabalável ao meu lado, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua força, paciência e amor foram essenciais para que eu pudesse seguir em frente com serenidade e determinação.

Ao meu filho, Pedro Henrique Santos da Costa, cuja alegria de viver e inteligência aguçada me inspiram todos os dias. Seu entusiasmo e curiosidade me lembram constantemente do valor do conhecimento e da importância de persistir.

Ao Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg, agradeço pela orientação técnica, pelas valiosas contribuições e correções acadêmicas, pelo aprendizado imenso que tive durante todo o trabalho e pelo incentivo contínuo ao longo desta jornada.

Ao Prof. Dr. Alexandre Bernardino Alves Maurício, minha sincera gratidão pela coorientação atenta, disponibilidade inabalável, companheirismo em campo pelo apoio científico e pelas importantes reflexões que enriqueceram este trabalho.

Ao corpo docente e técnico do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos (PGSISCO), pela excelência acadêmica, pela dedicação e pelo ambiente formativo de alto nível.

À Secretaria do Patrimônio da União (SPU), pelo apoio institucional, e incentivo, indispensável para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Laboratório de topografia e Geodésia CPP-CEM-UFPR, e Laboratório de oceanografia costeira e geoprocessamento LOCG-CEM pela disponibilização das infraestruturas equipamentos e suporte técnico nas atividades de campo.

Ao Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB), pela cessão de dados geoespaciais e pela contribuição técnica essencial na fase analítica da pesquisa.

Ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), pelo valioso trabalho de simulação da maré astronômica referente ao ano de 1831, utilizando dados da estação maregráfica da Marina do Poço.

A todos vocês que, de alguma forma, contribuíram para a construção deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

“Como sou pouco e sei pouco, faço o pouco que me cabe me dando por inteiro.”
(THIAGO DE MELLO, *Poesia comprometida com a minha e a tua vida*, 1975,)

RESUMO

A costa brasileira possui cerca de 8.500 km de extensão contínua, configurando-se como uma das maiores do mundo. Dentre as 30 cidades mais populosas do país, 13 encontram-se situadas em regiões litorâneas (IBGE, 2023), inseridas em ecossistemas costeiros caracterizados pela transição entre o continente e o mar. Esses ambientes são influenciados pela dinâmica das marés e englobam áreas como estuários, lagunas, manguezais e embocaduras fluviais, onde a interação entre processos continentais e marinhos é predominante. De acordo com o Decreto-Lei nº 9.760 de 5 de setembro de 1946, a influência das marés com variação periódica mínima de 5 cm no nível da água em rios, lagos ou lagoas define o limite da influência marinha para fins de demarcação dos terrenos de marinha pela Secretaria do Patrimônio da União (SPU). Este estudo foi concentrado no estabelecimento do limite máximo do alcance da oscilação da maré, onde a altura atinge 5 cm nos Rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, ambos pertencentes ao Complexo Estuarino de Paranaguá. Para isso, foram instalados sensores de pressão para medir a variação do nível da água em locais previamente selecionados ao longo do curso dos rios. Os dados obtidos foram integrados a pontos altimétricos derivados de aerolevantamento por LiDAR (Light Detection and Ranging) e rastreamento via GNSS (Global Navigation Satellite System) permitindo a identificação precisa da posição altimétrica correspondente ao critério legal de influência da maré. O estudo revela que o alcance da maré avança 44,86 km à montante da foz do Rio Guaraguaçu, com altitude normal de 1,78 m no ponto onde a altura oscila 5 cm. No Rio Nhundiaquara o local de oscilação de 5 cm foi localizado a 15,55 km da foz, com altitude normal de 1,23 m.

Palavras-chave: Preamar médio 1831. Altura da maré. Rio Guaraguaçu. Rio Nhundiaquara.

ABSTRACT

Brazil's coastline extends approximately 8.500 km in a continuous stretch, making it one of the longest in the world. Among the 30 most populous cities in the country, 13 are located in coastal regions (IBGE, 2023), situated within coastal ecosystems characterized by the transition between land and sea. Tidal dynamics influence these environments and encompass areas such as estuaries, lagoons, mangroves, and river mouths, where the interaction between continental and marine processes predominates. According to Decree-Law No. 9,760 of September 5, 1946, a minimum periodic tidal variation of 5 centimeters in the water level of rivers, lakes, or lagoons defines the limit of marine influence to demarcate federal coastal lands (terrenos de marinha) by the Secretariat of the Union's Heritage (SPU). This study focused on determining the maximum upstream extent of tidal oscillation where the water level variation reaches 5 cm in the Guaraguaçu and Nhundiaquara Rivers, both part of the Paranaguá Estuarine Complex. Pressure sensors were installed to measure variations in water levels at previously selected locations along the river courses. The collected data was integrated with elevation points obtained from LiDAR (Light Detection and Ranging) aerial surveys and GNSS (Global Navigation Satellite System) positioning, allowing precise identification of the altimetric position corresponding to the legal criterion of tidal influence. The results indicate that tidal influence extends 44.86 km upstream from the mouth of the Guaraguaçu River, with an altitude of 1.78 meters at the point where the water level oscillates by 5 cm. In the Nhundiaquara River, the 5 cm oscillation point was located 15.55 km from the river mouth, at an altitude of 1.23 meters.

Keywords: Mean high water (1831). Tide height. Guaraguaçu River. Nhundiaquara River.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA - Agência Nacional das Águas

ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedade Americana para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto)

CEP - Complexo Estuarino de Paranaguá

CGPs - Ground Control Points (Pontos de Controle em Solo)

GNSS - Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LiDAR - Light Detection and Ranging (Detecção e Alcance da Luz)

LPM – Linha do Preamar Médio

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital do Terreno

NMM - Nível Médio do Mar

PPP – Processamento por Ponto Preciso

RMS - Root Mean Square (Raiz do Erro Quadrático Médio)

RPA - Aeronave Remotamente Pilotada

RTK - Real Time Kinematic (Cinemático em Tempo Real)

SPU - Secretaria do Patrimônio da União

TCU - Tribunal de Contas da União

TIN - Triangular Irregular Network (Rede Irregular Triangular)

TLS - Terrestrial Laser Scanning (Varredura a Laser Terrestre)

UTM - Universal Transverse Mercator (Universal Transversa de Mercator)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	11
1.2 PROBLEMA	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.3 JUSTIFICATIVA	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 MARÉS.....	16
3.2 CONSTITUINTES HARMÔNICAS	17
3.3 NÚMERO DE FORMA.....	17
3.4 PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM ESTUÁRIOS.....	18
3.5 LIDAR.....	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE DO PREAMAR-MÉDIO	22
4.2 MEDIÇÃO DA OSCILAÇÃO DO NÍVEL DAS ÁGUAS	24
4.2.1 Análise dos dados de nível.....	28
4.3 PLANIALTIMETRIA.....	29
4.4 AEROLEVANTAMENTO LIDAR	29
5 RESULTADOS.....	31
5.1 RIO GUARAGUAÇU	31
5.2 RIO NHUNDIAQUARA.....	36
5.3 DISCUSSÕES	40
5.4 CONCLUSÕES	42
5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A demarcação dos terrenos de marinha constitui tema de elevada relevância para a gestão do patrimônio público no Brasil, com implicações diretas nas esferas territorial, jurídica, ambiental e socioeconômica. Conforme estabelecido pelo Artigo 2 do Decreto-Lei nº 9.760/1946, tais terrenos são definidos como faixas de terra situadas ao longo do litoral, medidos horizontalmente 33 (trinta e três) metros em direção ao continente a partir da linha do preamar-médio do ano de 1831, e se estendem para as margens de rios e lagos sujeitos à influência das marés com, no mínimo 5 (cinco) centímetros de oscilação periódica no nível das suas águas.

Em áreas de baixa declividade e em zonas estuarinas, o avanço da maré pode atingir grandes distâncias de acordo com as características geomorfológicas locais e a amplitude da maré. Um exemplo emblemático é o rio Amazonas, de acordo com Gallo e Vinzon (2003) a influência da maré alcança 900 (novecentos) quilômetros rio adentro, impactando diretamente a ocupação humana, atividades produtivas e unidades de conservação ambiental. Nessas regiões, a identificação precisa do limite da influência marítima torna-se uma tarefa complexa, exigindo abordagens metodológicas rigorosas e tecnologias específicas que assegurem a validade técnica e jurídica do processo de delimitação.

A delimitação dos terrenos de marinha ao longo da diversidade geomorfológica da costa brasileira é complexa e desafiadora, exigindo critérios técnicos e procedimentos específicos. Entre eles destacam-se a análise dos níveis das preamares regredidos ao ano de 1831, as alterações geomorfológicas ocorridas ao longo do tempo, e a interpretação de documentos históricos, cartas topográficas e arquivos vetoriais. No entanto, ainda existem lacunas metodológicas no processo de identificação quando se trata de definir o limite da influência da maré, especialmente em ambientes estuarinos e fluviais. Nesse contexto, o emprego de tecnologias geoespaciais, tais como sensores remotos, aerolevantamentos com LiDAR e sensores de pressão instalados em pontos estratégicos, tem se mostrado fundamental para o aprimoramento da acurácia nas demarcações.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo principal definir o limite da influência da maré por meio da aplicação integrada de metodologias baseadas em dados espaciais e medições em campo, em conformidade com os preceitos legais vigentes. Para tanto, os rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, situados

na área de drenagem do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), no estado do Paraná, foram selecionados como áreas de estudo de caso. Esses dois rios apresentam características geomorfológicas contrastantes, sendo o Guaraguaçu um rio de planície com baixo gradiente hidráulico, e o Nhundiaquara um rio de serra com declividade acentuada, o que permite testar a aplicabilidade do método em diferentes contextos fluviais de outras regiões do litoral brasileiro com características semelhantes.

Dessa forma, o estudo realizado no estado do Paraná poderá subsidiar futuras iniciativas de demarcação em outros rios estuarinos do país, contribuindo para a padronização metodológica e o aprimoramento técnico das ações de gestão do patrimônio da União. Busca-se, com isso, contribuir para o aperfeiçoamento das práticas de demarcação de terrenos de marinha, promovendo maior segurança jurídica, além de mitigar potenciais conflitos fundiários em áreas sob domínio da União.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho, os rios Guaraguaçu e Nhundiaquara foram selecionados como estudo de caso devido às suas características geomorfológicas singulares, e significativa extensão que ocupam na área de drenagem do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). O CEP estabelece sua conexão com o oceano Atlântico por meio dos canais da Galheta, Norte, e de Superagui, é geomorfologicamente classificado como um estuário de planície costeira (ANGULO, 1986). A região está sob influência de um regime de marés semidiurnas, a altura da maré é aumentada a montante, especialmente durante as marés de sizígia, quando varia de 1,70 m na entrada do CEP, para 2,70 m em Antonina (CARRILHO, 2022)

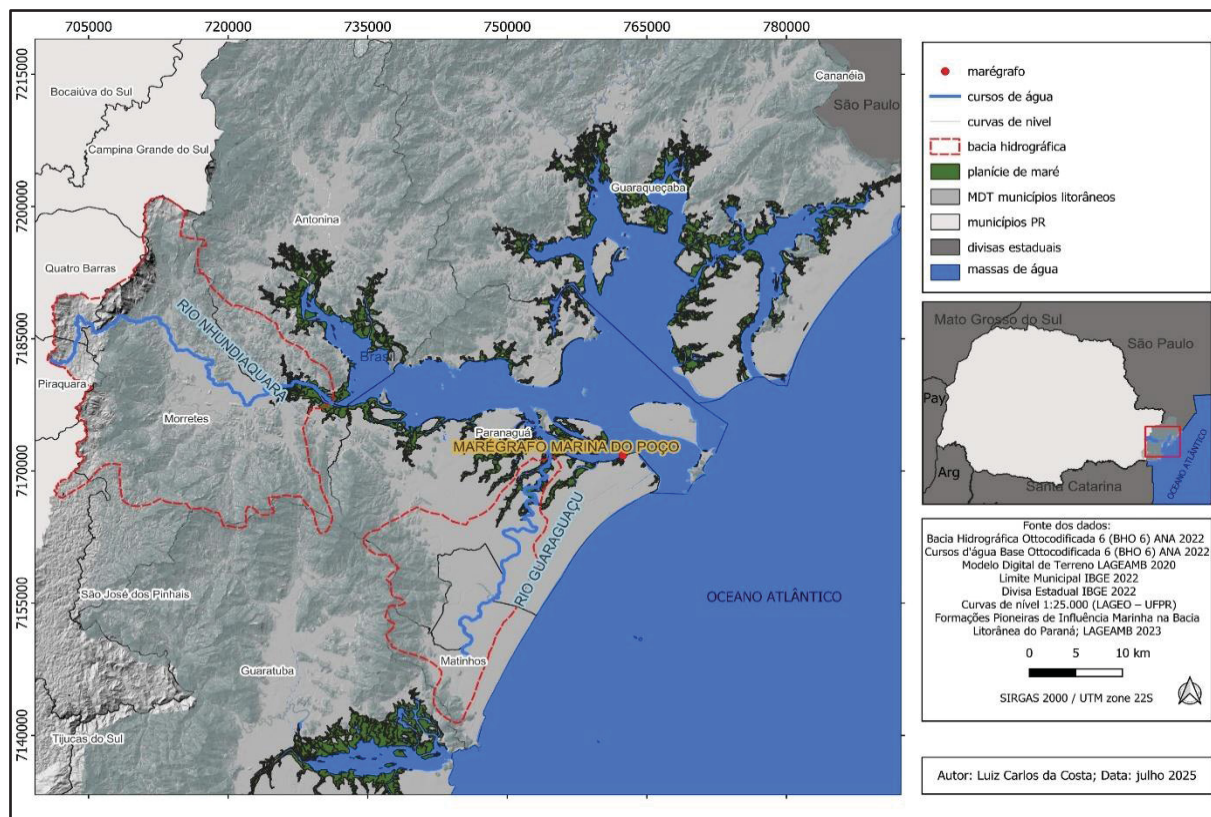
Durante as marés de quadratura, a altura da maré é reduzida para menos de 80% da maré de sizígia, e variações entre 0,70 e 1,10 m durante as quadraturas (LANA *et al.*, 2001); (MARONE e JAMIYANAA, 1997). A dinâmica local, bem como o transporte dos sedimentos areno-lodosos do fundo, é governada principalmente pelas correntes de maré (PALADINO *et al.*, 2022). O CEP apresenta morfologia variada, composta por canais profundos, áreas rasas e zonas intertidais. A profundidade média é de aproximadamente 10 m, podendo ultrapassar 20 m nos canais principais. Quanto à composição do substrato, predominam sedimentos lamosos nas áreas mais

abrigadas e arenosos nas regiões de maior energia hidrodinâmica, como nos canais de maré e desembocaduras (CATTANI e LAMOUR 2011). A circulação é predominantemente controlada pelas correntes de maré, com predomínio das correntes de vazante sobre as de enchente (NOERNBERG *et al.*, 2004).

O CEP é alimentado por uma rede de drenagem com área estimada de 3.870 km². Desse total, aproximadamente 2.188 km² correspondem às bacias que drenam diretamente para as baías de Antonina e Paranaguá, representando cerca de 54% da área de drenagem do complexo (NOERNBERG *et al.*, 2006). As planícies de maré associadas ao CEP abrangem uma área aproximada de 295,5 km², incluem extensos manguezais, bancos de lama e zonas alagáveis. As bacias hidrográficas dos rios Nhundiaquara e Guaraguaçu apresentam áreas recobertas por planície de maré em proporções distintas.

De acordo com o Manual de Construção da Base Hidrográfica Ottocodificada – Nível 6, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara possui uma área total de aproximadamente 2.900 km², enquanto a bacia do rio Guaraguaçu abrange 660,43 km². O recorte espacial do mapeamento das formações pioneiras com influência marinha, disponibilizado pelo Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB/UFPR) demonstra que cerca de 9,95 km² da bacia do Nhundiaquara são ocupados por planícies de maré, representando aproximadamente 0,34% de sua área total. Na bacia do Guaraguaçu, as planícies de maré abrangem 6,85 km², o que corresponde a 1,04% da área da bacia. A espacialização dessas feições encontra-se representada no mapa de localização dos rios estudados (FIGURA 1).

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DOS RIOS GUARAGUAÇU E NHUNDIAQUARA NO CEP.



FONTE: O autor (2024).

1.2 PROBLEMA

A Secretaria do Patrimônio da União (SPU) estabeleceu como meta demarcar toda a costa brasileira, até o final do ano de 2025, incluindo as reentrâncias costeiras, conforme determina o Acórdão nº 1286/2021-TCU/Plenário, do Tribunal de Contas da União, todavia, se observa a ausência de um procedimento metodológico padronizado e tecnicamente validado que possibilite a identificação precisa do ponto onde a oscilação da maré atinge a variação mínima de 5 cm, conforme preconizado pelo Decreto-Lei nº 9.760/1946. Essa lacuna metodológica compromete a uniformidade e a segurança jurídica na delimitação dos terrenos de marinha, especialmente em áreas de transição entre ambientes estuarinos e fluviais, onde fatores sazonais, meteorológicos e hidrológicos podem interferir nos dados de nível da água. Tais variações dificultam a distinção entre oscilações de origem astronômica e aquelas induzidas por chuvas, ventos ou alterações no escoamento fluvial, tornando a delimitação dependente de critérios subjetivos ou inconsistentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar o limite da influência das marés astronômicas nos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, localizados na bacia de drenagem do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), visando a delimitação dos terrenos de marinha até onde, por influência da maré, o nível das águas oscila em 5 cm de altura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir o limite da influência da maré astronômica através de instalação de sensores de nível ao longo dos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara;
- Identificar por meio de dados pluviométricos, fatores sazonais ou episódicos que interferem na determinação do limite da maré astronômica nesses rios;
- Identificar a localização do ponto de transição entre os domínios estuarino e fluvial em ambos os rios, utilizando levantamento GNSS;
- Determinar a cota altimétrica correspondente ao limite da influência da maré, através de levantamento LiDAR.

2.3 JUSTIFICATIVA

A competência para a demarcação de terrenos de marinha é atribuída à SPU, conforme o Decreto-Lei nº 9.760/1946, art. 9º. No entanto, há uma lacuna metodológica significativa no que se refere à definição precisa da influência da maré em estuários e rios da zona costeira brasileira. A demarcação desses terrenos fundamenta-se em critérios jurídicos históricos, sendo a linha do preamar-médio (LPM) de 1831 o marco legal de referência. A fixação dessa linha teve por objetivo evitar variações temporais e conflitos de posse, pois uma vez estabelecida, a LPM é considerada imutável, não variando no tempo e no espaço. A correta delimitação dos terrenos de marinha é essencial para garantir segurança jurídica, ordenamento territorial e proteção ambiental aos ecossistemas costeiros e estuarinos. Esses

terrenos margeiam ecossistemas sensíveis, como manguezais, restingas e regiões ribeirinhas, que abrigam comunidades tradicionais e biodiversidade relevante. A delimitação adequada dos limites territoriais contribui para coibir ocupações irregulares, fortalece os instrumentos de fiscalização e viabiliza políticas públicas de destinação, conservação ambiental e desenvolvimento sustentável.

A escolha dos rios Nhundiaquara e Guaraguaçu justifica-se pelas distintas características geomorfológicas que apresentam. O rio Nhundiaquara possui declividade acentuada, e conseqüentemente alto gradiente hidráulico, enquanto o rio Guaraguaçu apresenta baixo gradiente hidráulico por ocupar extensa faixa de planície costeira, sendo composto por canais sinuosos e áreas úmidas (NOERNBERG *et al.*, 2006). Essas diferenças tornam os dois sistemas representativos do conjunto de rios do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), possibilitando a replicabilidade da metodologia proposta a outros corpos hídricos da região. Ademais, a ampla cobertura hidrográfica e a significativa extensão longitudinal de ambos os rios no interior do sistema estuarino reforçam sua relevância para os objetivos deste estudo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Os estuários se formam em regiões costeiras em decorrência da elevação do nível do mar após o término de glaciações. A definição de estuário varia conforme os critérios adotados, como morfologia, salinidade ou hidrodinâmica. Segundo Pritchard (1967), estuários são corpos d'água costeiros, semiconfinados, onde ocorre a mistura entre água doce, proveniente do continente, e água salgada, oriunda do oceano. Fairbridge (1980) os define com base em critérios morfológicos, como reentrâncias marinhas em vales fluviais, que se estendem até o limite de propagação da maré dinâmica, sendo divididos em três zonas: baixa (marítima), média (mista) e superior (flúvio-marinha). Kjerfve (1990), por sua vez, propõe uma classificação baseada na conexão com o oceano e no regime salino, identificando três zonas distintas: zona de maré do rio (ZR), com salinidade inferior a 1 e sujeita à influência das marés; zona de mistura (ZM), caracterizada pela mescla de águas doces e salgadas; e zona costeira (ZQ), correspondente à área alcançada pela pluma da maré vazante.

3.1 MARÉS

As marés consistem em oscilações verticais periódicas do nível das águas oceânicas, resultantes principalmente da força gravitacional exercida pela Lua e pelo Sol sobre a Terra, em conjunto com os efeitos da rotação do planeta. Esses fenômenos constituem movimentos regulares que influenciam significativamente a hidrodinâmica costeira e estuarina. Nos ambientes estuarinos, a propagação da maré não ocorre de forma uniforme, sendo modulada por diversos fatores, entre os quais se destacam a gravidade, a pressão atmosférica, o atrito com o leito e as margens do canal, além da geometria do estuário e da estratificação vertical das massas d'água, GALLO (2004). Tais fatores podem alterar a forma, a velocidade, a altura, e a amplitude da maré ao longo do gradiente terra-mar. Segundo Miranda (2002), é importante distinguir os conceitos de altura de maré e amplitude de maré: a altura de maré refere-se à diferença entre os níveis de preamar (nível máximo) e baixa-mar (nível mínimo), enquanto a amplitude de maré corresponde à metade da altura total da maré em relação ao nível médio.

As marés podem ser classificadas de acordo com a variação de sua altura (distância vertical entre a crista e o cavado), conforme apresentado na TABELA 1. A distância entre duas cristas ou cavados consecutivos é o comprimento de onda, sua propagação constitui um ciclo de maré, cujo intervalo pode variar de acordo com o regime atuante no ambiente. A maré semidiurna possui um período de meio dia lunar ou equivalente a 12,4 horas, enquanto a maré diurna, o período é de um dia lunar ou 24,8 horas. Alguns locais apresentam desigualdades entre os tipos de maré, variando o período de duração do ciclo de maré a partir da altura máxima que elas alcançam em determinado ambiente.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE MARÉS POR TIPOS E ALTURAS.

Tipo	Altura Máxima
Micromaré	$H_{\text{máx}} < 2 \text{ m}$
Mesomaré	$2 < H_{\text{máx}} < 4 \text{ m}$
Macromaré	$4 < H_{\text{máx}} < 6 \text{ m}$
Hipermaré	$H_{\text{máx}} > 6 \text{ m}$

FONTE: Davies (1964).

3.2 CONSTITUINTES HARMÔNICAS

As constituintes harmônicas de maré são componentes individuais de maré, representadas por ondas senoidais, extraídas de séries temporais de marés, permitindo representar variações periódicas observadas nos níveis da água em oceanos, estuários e rios. Essas constituintes derivam dos efeitos gravitacionais combinados da Lua, do Sol e de outros fatores astronômicos e geofísicos, possibilitando modelar o comportamento da maré de forma preditiva e sistemática. Cada constituinte harmônica apresenta um período específico (tempo necessário para completar um ciclo) e uma amplitude associada característica de cada localidade, refletindo sua contribuição relativa à oscilação total do nível d'água, (BROWN, 1989). Essa decomposição permite a reconstrução precisa da maré por meio da somatória dessas ondas periódicas, sendo uma técnica fundamental na análise harmônica de marés. No presente estudo, foram consideradas as principais constituintes harmônicas, conforme ilustrado na TABELA 2.

TABELA 2– PRINCIPAIS CONSTITUINTES HARMÔNICAS.

CONSTITUINTE	PERÍODO (HORAS)	ORIGEM	COMPONENTE
M2	12,42	Lua	Semidurna
S2	12,00	Sol	Diurna
K1	23,93	Lua+Sol	Diurno
N2	12,66	Lua	Diurno
O1	25,82	Lua	Lua-Terra (elongação lunar)
P1	24,07	Sol	Diurna
M4, M6	6,21 - 4,14	Não-linear	marés rasas (gerados em águas costeiras)

FONTE: O Autor (2024) adaptado de BROWN (1989).

3.3 NÚMERO DE FORMA

O número de forma da maré, também conhecido como índice de forma (F), é uma razão entre as amplitudes das principais constituintes harmônicas diurnas e semidiurnas, utilizada para classificar o tipo de regime de maré predominante em uma determinada localidade. Esse índice é calculado com base na fórmula (PUGH, 1987), (POND e PICKARD, 1983):

$$(F=K1+O1/M2+S2)$$

Onde K1 e O1 representam as amplitudes das constituintes diurnas principais, enquanto M2 e S2 correspondem às amplitudes das principais constituintes semidiurnas. Os valores obtidos para F permitem classificar o regime de maré (TABELA 3).

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DAS MARÉS SEGUNDO NÚMERO DE FORMA (F).

VALOR DE F	COMPONENTE	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS
$F < 0,25$	Mista com predomínio semidiurno	Duas preamares e duas baixa-mares aproximadamente iguais por dia lunar.
$0,25 \leq F < 1,5$	Mista com predomínio diurno	<i>Duas preamares e duas baixa-mares com amplitudes diferentes por dia lunar.</i>
$1,5 \leq F < 3,0$	Diurna	<i>Geralmente duas preamares e duas baixa-mares com amplitudes distintas; ocasionalmente, apenas uma de cada por dia.</i>
$F \geq 3,0$	Diurna	Uma preamar e uma baixa-mar por dia lunar

FONTE: Adaptado de DEFANT (1961); WRIGHT, COLLING, PARK (1999).

3.4 PROPAGAÇÃO DA MARÉ EM ESTUÁRIOS

A propagação da onda de maré em estuários pode se apresentar de três maneiras distintas (progressiva, estacionária ou de comportamento misto), dependendo de fatores como o comprimento do estuário, sua geometria, a profundidade do canal, a descarga fluvial e as condições de contorno no oceano (DALBONE, 2014). A análise dessas formas é fundamental para a correta interpretação da influência da maré em regiões fluviais, sobretudo quando o objetivo é a delimitação precisa de terrenos de marinha.

Onda de maré progressiva é aquela que se propaga continuamente em uma única direção, a partir do oceano em direção ao interior do estuário, sem interferência significativa de reflexões. Essa condição ocorre quando a energia da maré é amplamente dissipada por atrito antes de haver qualquer retorno da onda, ou quando o estuário é suficientemente longo para impedir a formação de ondas refletidas significativas. Segundo Dyer (1997) e Miranda (2002), ondas progressivas são comuns em estuários longos e estreitos, com baixa capacidade reflexiva, como em canais com fundo lamoso e vegetação marginal que absorve energia. Um exemplo clássico ocorre no rio Amazonas, onde a propagação da maré pode ser observada por centenas de quilômetros como uma onda de maré que avança rio acima,

evidenciando o caráter fortemente progressivo da maré nesse sistema (GALLO; VINZON, 2003).

A onda de maré estacionária resulta da superposição de duas ondas com mesmo comprimento e amplitude que se propagam em direções opostas. Isso ocorre quando parte da energia da maré é refletida em obstáculos físicos ou variações abruptas na geometria do estuário, como estreitamentos, pontes, portos ou mudanças no gradiente de profundidade. A interferência entre essas ondas forma um padrão fixo de nós (pontos com mínima oscilação) e ventres (pontos com máxima oscilação). Conforme Gallo e Vinzon (2005), esse tipo de comportamento é mais frequente em estuários curtos ou encerrados, ou ainda em baías parcialmente fechadas, como a Baía de Todos os Santos (BA), onde a geometria semicircular e as bordas refletoras favorecem a formação de ondas estacionárias, nesse caso, a amplitude da maré pode ser amplificada em determinadas regiões do estuário, conforme o posicionamento dos ventres da onda.

A onda de comportamento misto, é caracterizada pela coexistência de componentes progressivos e estacionários. Isso ocorre porque parte da energia da maré é refletida ao longo do canal, mas a maior parte ainda se propaga progressivamente. O resultado é uma onda com características híbridas, cuja morfologia e fase são moduladas tanto pela propagação quanto pela reflexão. De acordo com Nguyen (2008) e Buschman *et al.* (2010), esse comportamento é particularmente comum em sistemas estuarinos complexos e ramificados, nesse ambiente, a presença de múltiplos canais, variações abruptas de profundidade e a vegetação marginal influenciam a propagação e reflexão parcial da energia de maré, gerando padrões de maré assimétricos e espacialmente variáveis.

3.5 LIDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativo que utiliza pulsos de laser utilizado para medir distâncias e gerar representações tridimensionais de superfícies e objetos. Funciona de maneira semelhante a um "radar a laser", emitindo feixes de luz pulsada e calculando o tempo que cada pulso leva para retornar ao sensor após refletir em um alvo.

Esses dados são processados para produzir mapas com precisão centimétrica a partir de milhões de medições conhecidas como nuvens de pontos 3D, que podem ser convertidas em Modelos Digitais de Terreno (MDT). Essa capacidade torna a tecnologia particularmente eficaz para a caracterização de ambientes complexos, como planícies de maré, margens sinuosas de rios e zonas úmidas densamente vegetadas, onde métodos convencionais de levantamento topográfico apresentam grandes limitações tanto operacionais, de precisão e de acurácia. Os sistemas LiDAR podem ser classificados de acordo com a sua plataforma de aquisição: terrestres (Terrestrial Laser Scanning – TLS), aéreos (acoplados a RPA ou aviões) e espaciais (instalados em satélites). Além disso, distinguem-se em dois tipos principais: LiDAR topográfico, utilizado para mapear superfícies terrestres, e LiDAR batimétrico, empregado na medição de corpos d'água (MALLET; BRETAR, 2009).

Quando aplicada a partir de plataformas aéreas (aerotransportado), é capaz de coletar milhões de pontos por segundo, gerando nuvens de pontos tridimensionais (XYZ) que representam com alta fidelidade a morfologia do terreno e a estrutura da vegetação (HUNSUCKER *et al.*, 2006), (BOROLINI *et al.*, 2017). Em áreas cobertas por vegetação densa, como florestas tropicais ou estuarinas, o grande diferencial do LiDAR aerotransportado é sua capacidade de penetrar nas copas vegetais e registrar múltiplas reflexões de pulsos laser. Isso permite a distinção entre diferentes estratos da vegetação, como o dossel, o sub-bosque e o solo, possibilitando a obtenção de modelos digitais de superfície (MDS) e modelos digitais do terreno (MDT) mesmo sob dosséis fechados (PONTES *et al.*, 2020), (REUTEBUCH *et al.*, 2005).

Os pulsos emitidos pelo sensor LiDAR são refletidos em diversas superfícies ao longo de seu caminho, com cada retorno sendo registrado. Em áreas de florestas, o primeiro retorno, geralmente está associado à copa das árvores, e os retornos subsequentes, que podem alcançar troncos, arbustos e o solo que fornecem informações fundamentais para o mapeamento estrutural da vegetação e para a modelagem precisa do relevo subjacente (LEITE *et al.*, 2023). A densidade de pontos (pulsos por metro quadrado) e a configuração angular do sensor são fatores críticos que influenciam diretamente a capacidade de detecção do solo em áreas com vegetação muito densa (SILVA *et al.*, 2021).

Estudos nacionais como os realizados em regiões da Floresta Amazônica e Mata Atlântica demonstram o sucesso da tecnologia LiDAR na obtenção de dados de elevação em ambientes altamente vegetados, contribuindo significativamente para o

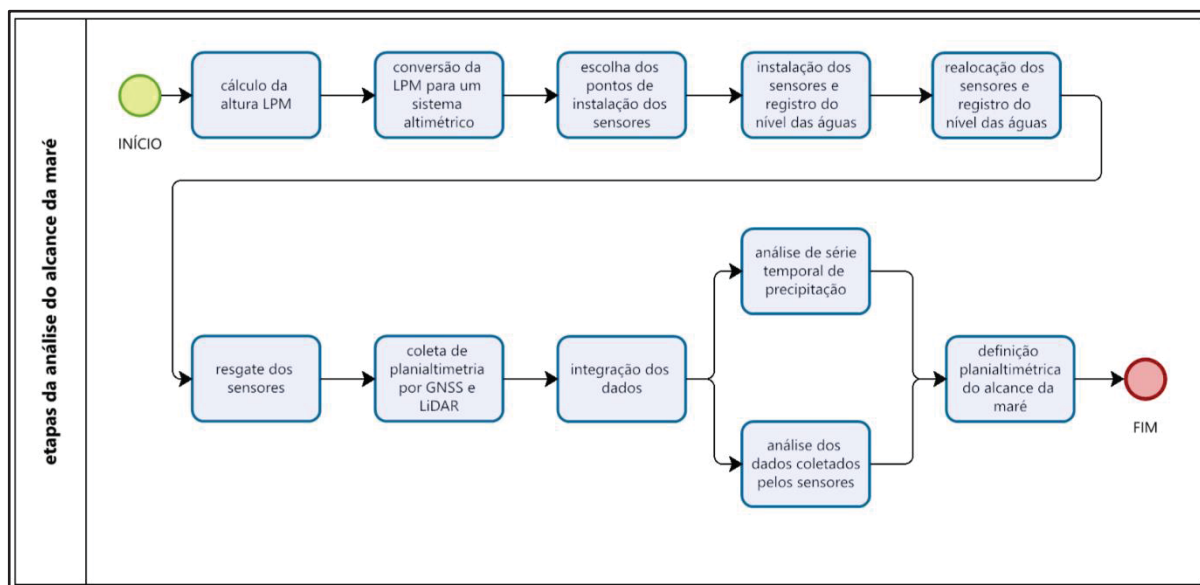
mapeamento topográfico, a estimativa de biomassa florestal e a análise de processos geomorfológicos (GOMES *et al.*, 2016), (GODIN *et al.*, 2019). Em áreas estuarinas com vegetação de manguezal, o LiDAR também tem se mostrado eficaz na caracterização do relevo e da dinâmica sedimentar, mesmo em condições de difícil acesso e com elevada umidade do solo (VIEIRA *et al.*, 2020).

O uso de LiDAR em ambientes florestais densos tem ampliado as possibilidades de análise em diversas escalas e contextos ambientais, especialmente onde tecnologias passivas, como imagens ópticas, apresentam limitações devido à obstrução da vegetação. Na última década, novas técnicas de sensoriamento remoto levaram a um aumento considerável em informações sobre terrenos e topografia, fornecendo uma base para o desenvolvimento de novas metodologias para analisar as superfícies da Terra (TAROLLI *et al.*, 2009). O LiDAR aerotransportado revolucionou o mapeamento topográfico, permitindo resoluções submétricas mesmo em grandes áreas, e produz dados topográficos de alta resolução com vantagens notáveis em relação às técnicas tradicionais de levantamento proporcionando maior precisão, acurácia, resolução espacial e capacidade de penetração em cobertura vegetal (SLATTON *et al.*, 2007).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para compreender a propagação das marés e delimitar seu alcance a montante nos rios Nhundiaquara e Guaraguaçu adotou-se uma abordagem multimetodológica. Inicialmente, determinou-se a altura do preamar médio de 1831 em um marégrafo de referência, convertendo esses valores para um sistema altimétrico comum. A determinação altimétrica permite identificar se o alcance da influência da maré ocorre em altitudes superiores ou inferiores àquela referente à linha do preamar médio histórico. Complementarmente, foram analisadas as séries temporais de precipitação de ambos os rios, durante os mesmos períodos dos registros das oscilações do nível d'água que foram coletados por sensores de pressão instalados em pontos estratégicos. Para determinar a altitude dos pontos de instalação dos sensores, realizou-se aerolevantamento com tecnologia LiDAR aerotransportado associado aos pontos geodésicos obtidos com receptores GNSS, que forneceram referências altimétricas precisas nos locais-chave de medição. Cada uma dessas etapas está sintetizada na forma de fluxograma conforme mostra a Figura 2, e detalhadas nas seções seguintes.

FIGURA 2 – ETAPAS METODOLÓGICAS PARA DETERMINAR O ALCANCE DA INFLUÊNCIA DA MARÉ NOS RIOS GUARAGUAÇU E NHUNDIAQUARA.



FONTE: O autor, (2025).

4.1 DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE DO PREAMAR-MÉDIO

A altitude do preamar médio regredida ao ano de 1831 é definida como a média aritmética das marés máximas de sizígia registradas naquele ano, associada a um referencial altimétrico, esse referencial indica o início de onde deve ser gerada a linha do preamar médio (LPM), que é o parâmetro fundamental para demarcação dos terrenos de marinha. Este parâmetro funciona como quesito técnico-legal para verificar se a influência da maré está em uma altitude acima ou abaixo da LPM. Para a determinação do preamar médio de 1831 foram utilizados dados da estação maregráfica mais próxima à foz dos rios estudados (Marina do Poço - código 60148). As alturas das marés foram solicitadas ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), vinculado ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). As informações foram geradas a partir das constantes harmônicas da estação maregráfica, com base em observações históricas realizadas em diferentes períodos. A partir dessas constantes, o CHM realizou a simulação da maré astronômica para o ano de 1831. Para a estimativa da altura do preamar médio, adotou-se a seleção das doze maiores marés mensais previstas para o ano de 1831, conforme critério estabelecido no § 3º do artigo 56 da IN 28 (BRASIL, 2022). Posteriormente foi calculada a média aritmética chegando ao valor médio de 145 cm. (TABELA 4).

TABELA 4 – CÁLCULO DO PREMAR MÉDIO DE 1831 – ESTAÇÃO MARINA DO POÇO.

<i>DIA</i>	<i>HORA</i>	<i>MÁXIMA MENSAIS (CM)</i>
14/01/1831	00:00:00	148
12/02/1831	00:00:00	152
13/03/1831	00:00:00	152
10/04/1831	23:00:00	148
09/05/1831	23:00:00	140
25/06/1831	12:00:00	141
25/07/1831	13:00:00	142
23/08/1831	12:00:00	149
21/09/1831	12:00:00	151
19/10/1831	11:00:00	147
17/11/1831	11:00:00	137
03/12/1831	23:00:00	140
<i>PREAMAR MÉDIO</i>		145

FONTE: O autor (2025).

Como o valor do preamar médio refere-se à altura da régua do marégrafo Marina do Poço, que corresponde à distância vertical de um ponto da sua base ao topo (cota arbitrária), é necessário associar essa cota a um sistema de referência altimétrico, que pode ser mensurado a partir de um referencial geodésico (como o nível médio dos mares em equilíbrio) ou elipsoidal (modelo matemático usado em levantamentos GNSS). Para o cálculo da redução da cota em altitude física (compatíveis com o Datum Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro), foi utilizada a Referência de Nível (RN) (base2630) fornecida pelo Laboratório de Topografia e Geodésia CPP-CEM-UFPR, localizada no mesmo nível da RN-1 E2-II. O procedimento para a conversão da altura da régua do marégrafo em um referencial geodésico altimétrico foi realizado utilizando os dados do diagrama de equivalência (FIGURA 3) por meio da seguinte equação:

$$(X = Y-Z+N)$$

Onde:

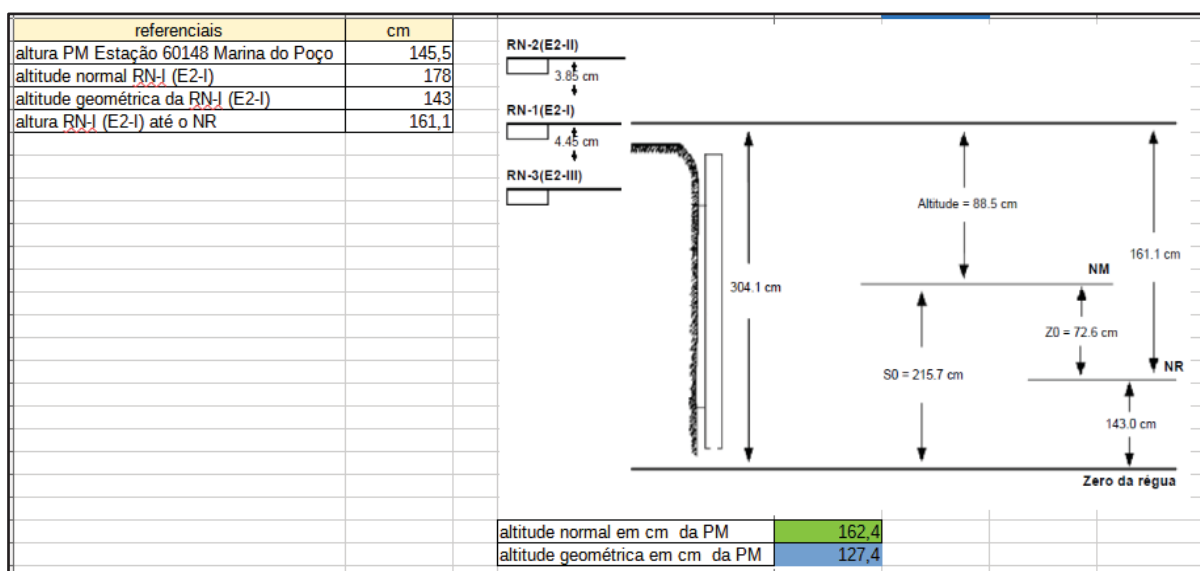
- X = altitude normal do preamar-médio;
- Y = altitude da Referência de Nível (RN-1 E2-II);

- Z = altura obtida pelo desnível entre a referência de nível até o nível de redução (extraído do diagrama de equivalência da ficha maregráfica) (FIGURA 3);
- N = altura do preamar-médio;

Aplicando os valores coletados para a estação Marina do Poço, tem-se:

- $X = 178 - 161,1 + 145,5$
- $X = 162,4 \text{ cm.}$

FIGURA 3 – DIAGRAMA DE EQUIVALÊNCIA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA MARINA DO POÇO.

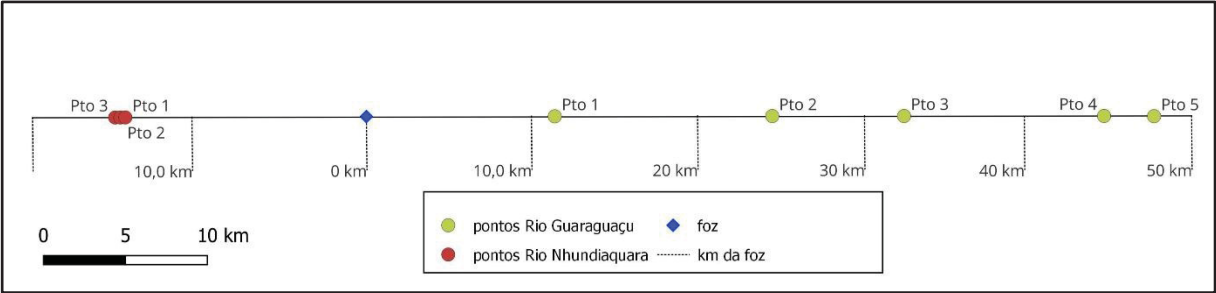


FONTE: O autor; CHM. (2025).

4.2 MEDIÇÃO DA OSCILAÇÃO DO NÍVEL DAS ÁGUAS

Para medição de oscilação no nível das águas nos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, foram utilizados sensores de nível do modelo Solinst Levellogger 5 Junior, baseados em tecnologia piezoresistiva de silicone, com precisão de 0,5 cm, configurados para realizar leituras a cada 10 minutos, instalados em 9 pontos ao longo do curso dos rios (FIGURA 4).

FIGURA 4 – CARTOGRAMA DA DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS DE REGISTRO EM RELAÇÃO A FOZ DOS RIOS GUARAGUAÇU E NHUNDIAQUARA.



FONTE: O autor (2025).

Os sensores permaneceram efetuando coletas contínuas durante períodos acima de trinta dias, intervalo que abrange um ciclo lunar completo e permite a extração das principais constituintes harmônicas da maré astronômica (TABELA 5).

TABELA 5 - PONTOS DE INSTALAÇÃO DOS SENSORES DURANTE AS DUAS CAMPANHAS

RIO	PONTO	DIAS	COORDENADAS (UTM)	DISTÂNCIA DA FOZ (km)
Guaraguaçu	1	34	752733.30 E - 7165049.49 S	11,5
Guaraguaçu	2	34	749466.37 E - 7159066.40 S	24,8
Guaraguaçu	3	34	747044.42 E - 7153403.17 S	32,7
Guaraguaçu	4	41	745357.00 E - 7150100.00 S	40,5
Guaraguaçu	5	41	745254.50 E - 7148009.70 S	44,8
Guaraguaçu	6	41	744550.42 E - 7145105.00 S	48,1
Nhundiaquara	1	40	720513.33 E - 7178956.23 S	14,7
Nhundiaquara	2	40	720183.00 E - 7179568.00 S	15,0
Nhundiaquara	3	40	719774.00 E - 7179815.00 S	15,61

FONTE: O autor (2024)

A seleção dos pontos de instalação dos sensores foi orientada por critérios técnicos que assegurassem sua submersão contínua, integridade física e confiabilidade dos dados ao longo do período de monitoramento. Foram considerados aspectos hidrológicos, ambientais, operacionais e logísticos, visando maximizar a precisão das medições e a durabilidade dos equipamentos.

Do ponto de vista hidrológico, foram escolhidos locais que apresentavam profundidade do nível da água acima de 150 cm em condições de estiagem, em trechos com fluxo laminar e baixa turbulência, a fim de reduzir interferências na

estabilidade dos registros e prevenir o acúmulo de sedimentos que pudessem comprometer a funcionalidade dos sensores.

Sob a perspectiva ambiental e física, os equipamentos foram instalados em áreas protegidas contra impactos externos, como tráfego de embarcações, ação de animais ou intervenções humanas. Optou-se por locais de difícil acesso, com menor risco de vandalismo, e com leito estável, livre de processos intensos de erosão ou assoreamento. Para garantir a fixação segura, os sensores foram ancorados em estruturas reforçadas de concreto. Adicionalmente, foram considerados fatores operacionais e logísticos, de modo a otimizar o trajeto de instalação e facilitar o acesso para futuras coletas ou manutenções.

A seleção dos pontos de instalação dos sensores de pressão foi realizada por meio de análise geoespacial, com o objetivo de garantir representatividade hidrodinâmica e viabilidade de instalação. Foram utilizadas curvas de nível com equidistância de 10 m, elaboradas a partir de levantamento topográfico de 2020 na escala 1:25.000, polígonos vetoriais de cobertura vegetal fluviomarina arbórea (manguezais), mapeados no ano de 2023; e Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 12,5 m de 2020, insumos obtidos junto ao Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais (LAGEAMB/UFPR), por meio da Infraestrutura de Dados Espaciais¹ (IDE). A integração desses produtos cartográficos no ambiente SIG, utilizando o software de geoprocessamento QGIS, permitiu identificar possíveis zonas de transição flúvio-marinha prioritárias para o monitoramento.

A análise das curvas de nível e do MDT auxiliou na estimativa preliminar das altitudes dos pontos de medição, enquanto os polígonos de vegetação foram utilizados como indicador de áreas potencialmente sujeitas à influência de maré. Esses critérios subsidiaram a definição dos locais de fundeio dos sensores, garantindo que estivessem posicionados em trechos adequados à observação das variações do nível da água ao longo dos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara.

Foram monitorados nove pontos de medição, distribuídos em duas campanhas de campo realizadas em períodos distintos. Os dados de nível obtidos

¹ disponível em: <https://ide.lageamb.ufpr.br/catalogue/#/dataset/164>. Acesso em: 23 jul. 2024.

pelos sensores foram normalizados em relação à altura média da série (por meio da subtração da média de cada registro), a fim de viabilizar a comparação entre locais com profundidades distintas.

FIGURA 5 1– EXEMPLO DE SENSORES, INTERFACE E PROGRAMA DE EXTRAÇÃO DOS DADOS, UTILIZADOS NAS DUAS CAMPANHAS DE REGISTROS.



Fonte: SOLINST 2024.

Os sensores utilizados (FIGURA 5) apresentam as seguintes especificações: alcance de profundidade 10 m, erro típico de $\pm 0,05\%$ (FS), correspondente a aproximadamente 0,5 cm de água, erro máximo de $\pm 0,1\%$ FS, ou 1,0 cm de água. Os valores de erro indicam a precisão do sensor na medição da pressão e, por consequência, do nível da água.

Erro Típico ($\pm 0,05\%$ FS ou 0,5 cm).

- $\pm 0,05\%$ FS (Full Scale) ou seja, o erro é 0,05% do alcance total do sensor, em condições normais, a medição pode variar $\pm 0,5$ cm do valor real.

Exemplo: O sensor tem um alcance de 10 m (1000 cm), o erro típico é:

$$0,05\% \times 1000\text{cm} = 0,5\text{cm}$$

Em condições extremas (como variações de temperatura, desgaste do equipamento ou interferências), o erro pode chegar a 0,1% do alcance total.

Erro Máximo ($\pm 0,1\%$ FS ou 1,0 cm).

- $\pm 0,1\%$ FS, o erro é 0,1% do alcance total o sensor.

No mesmo exemplo (1000 cm):

$$0,1\% \times 1000\text{cm} = 1,0\text{cm}$$

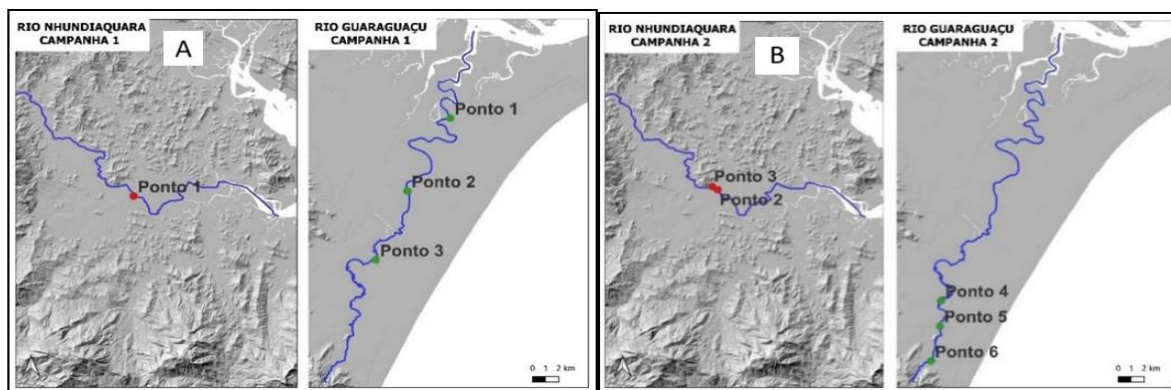
Ou seja, o pior cenário possível é uma variação de ± 1 cm em relação ao valor real.

O erro máximo também pode ser dado como um valor fixo, garantindo que nunca ultrapasse 1 cm em qualquer condição.

4.2.1 Análise dos dados de nível.

As séries dos dados da variação do nível da água foram submetidos à correção atmosférica, utilizando registros da estação meteorológica portátil (Ambient Weather WS-2902) do Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento (LOCG) localizada no Balneário Gaivotas município de Matinhos. As constituintes harmônicas das séries temporais foram extraídas utilizando o software PACMARE (FRANCO, 1997). Foram consideradas para essas análises as principais constituintes harmônicas das marés. A média das oscilações foi obtida a partir da diferença entre os picos máximos (cristas) e mínimos (vales) ao longo de um ciclo de maré, após correções atmosféricas e extração das componentes harmônicas da maré. Na primeira campanha de campo, realizada de 21 de novembro de 2023 a 4 de janeiro de 2024, foram instalados quatro sensores: três ao longo do rio Guaraguaçu (Pontos 1, 2 e 3) e um no rio Nhundiaquara (Ponto 1). Em uma segunda campanha, realizada entre os dias 27 de março de 2024 a 08 de maio de 2024, cinco sensores foram reposicionados, três no rio Guaraguaçu (Pontos 4, 5 e 6) e dois no rio Nhundiaquara (Pontos 2 e 3), (FIGURA 6).

FIGURA 6 – (A) PONTOS DE INSTALAÇÃO DOS SENSORES CAMPANHA 1; (B) PONTOS DE INSTALAÇÃO DOS SENSORES CAMPANHA 2.



FONTE: O autor (2025).

4.3 PLANIALTIMETRIA

A determinação da altitude e localização geográfica dos pontos de instalação dos sensores, em relação a um referencial geodésico, é condicionada à execução de levantamentos planialtimétricos. Para esse fim, foram realizadas coletas de dados geodésicos ao longo dos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, por meio da utilização de receptores GNSS em modo RTK. As estações de base foram posicionadas estrategicamente nas margens de ambos os rios e nas instalações do Centro de Estudos do Mar de Pontal do Paraná (CEM), situado em Balneário Mirassol. Adicionalmente, no momento do fundeio dos sensores, foram registradas as altitudes do espelho d'água, a fim de complementar as informações altimétricas dos locais monitorados (FIGURA 7A e 7B).

FIGURA(7A) ESTAÇÕES DE PONTOS BASE INSTALADAS NOS RIOS GUARAGUAÇU E NHUNDIAQUARA; (7B) COLETA DE ALTITUDE DO ESPELHO DE ÁGUA NO RIO GUARAGUAÇU.



FONTE: O autor (2025).

4.4 AEROLEVANTAMENTO LIDAR

Diante da escassez de dados altimétricos de alta resolução em regiões estuarinas e costeiras, como as encontradas nos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara, a Secretaria do Patrimônio da União (SPU), em parceria com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), adquiriu um RPA DJI Matrice 350 equipado com sensor LiDAR (Light Detection and Ranging).

No rio Nhundiaquara, a coleta dos dados altimétricos foi realizada por meio de levantamentos terrestres e fluviais. No entanto, essa abordagem se mostrou inviável no rio Guaraguaçu devido à extensa planície fluvial e à densa vegetação

arbórea de grande porte. Como alternativa, optou-se pelo levantamento remoto utilizando tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging). Para garantir a operação adequada do sistema e a manutenção do sinal entre receptor GNSS móvel acoplado à aeronave (ROVER) e a estação base (BASE), foi necessário identificar um terreno elevado que permitisse o sobrevoo da aeronave acima da copa das árvores. A solução adotada foi a abertura de uma trilha em um morro localizado às margens da Rodovia Alexandra-Matinhos (FIGURA 8A).

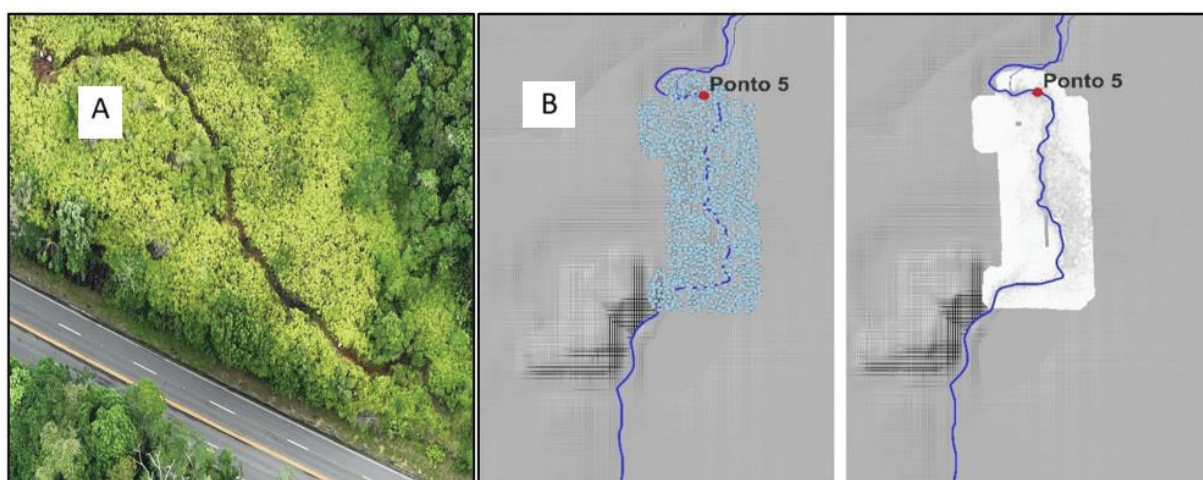
O planejamento para o aerolevante envolveu linhas de varredura paralelas com 50% de sobreposição, com altitude de cem metros para o voo, e parâmetros ajustados à densidade do dossel à frequência de pulso do sensor, a fim de maximizar a penetração dos feixes laser na vegetação. Durante a varredura, o LiDAR emitiu pulsos de alta frequência, configurados para registrar até cinco retornos por pulso, permitindo captar reflexos dos diferentes estratos vegetais e, principalmente, do solo.

O aerolevante por LiDAR realizado no Rio Guaraguaçu foi conduzido em uma área densamente vegetada e inacessível por via terrestre e fluvial, o que impossibilitou a implantação direta de pontos de controle em campo (GCPs) ao longo do trecho analisado. Mesmo com esse obstáculo, os dados foram adquiridos e processados segundo os parâmetros técnicos que asseguram o padrão de acurácia altimétrica Class 1, conforme estabelecido pela American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), para superfícies vegetadas densas, o qual admite um erro quadrático médio vertical de até 37 cm, com erro máximo vertical aproximado de $\pm 73,9$ cm para 95% de confiança (ASPRS, 2014).

Diante da inviabilidade de acesso direto, adotaram-se estratégias complementares para mitigar a ausência de GCPs na área-alvo, incluindo: i) o Pós-processamento cinemático por Ponto Preciso (PPP), com base em soluções disponibilizadas pelo IBGE (2024), que proporcionou maior acurácia ao posicionamento dos registros GNSS embarcados, e ii) o uso de pontos de controle indiretos extraídos de áreas adjacentes acessíveis, com altitudes verificadas a partir de superfícies de referência conhecidas, como vias pavimentadas e elementos de infraestrutura previamente mapeados. Adicionalmente, a nuvem de pontos gerada

(FIGURA 8B), foi processada no software CloudCompare², que permitiu a separação dos retornos referentes ao solo, distinguindo-os da vegetação e demais elementos superficiais. Este procedimento foi essencial para a geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) refinado, com acurácia compatível com análises altimétricas e precisão centimétrica, mesmo em ambientes com cobertura vegetal densa.

FIGURA 8: (A) TRILHA ABERTA PARA O LANÇAMENTO DO RPA; (B) NUVEM DE PONTOS E MDT GERADAS PELOS DADOS DO LEVANTAMENTO LIDAR.



FONTE: O autor (2025).

5 RESULTADOS

5.1 RIO GUARAGUAÇU

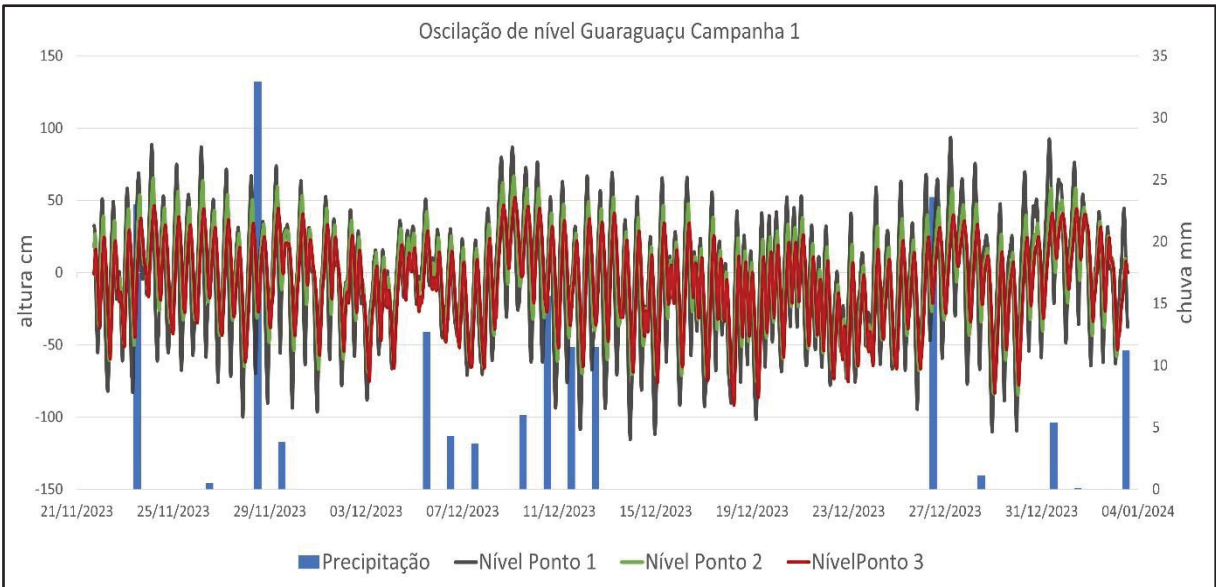
Os dados foram analisados separadamente por trechos, de acordo com as campanhas em que foram coletados. Os registros da primeira campanha de novembro nos Pontos 1, 2 e 3 são apresentados na FIGURA 9. O comportamento do nível evidencia a presença de um padrão oscilatório regular e cíclico, típico de ondas geradas pela influência de maré. A comparação entre os três pontos revela que, apesar da atenuação progressiva da altura das marés com médias decrescentes em direção à montante da foz conforme o distanciamento, é nítida a influência da maré

² *CloudCompare* é um software livre e gratuito de processamento de nuvens de pontos e modelos 3D, desenvolvido originalmente por Daniel Girardeau-Montaut em 2005. O projeto é mantido por uma comunidade de colaboradores e oferece ferramentas avançadas para edição, análise e visualização de dados geoespaciais. A versão utilizada neste trabalho foi a **2.13.2**, lançada em **Kharkiv em 6 de julho de 2024**. Disponível em: www.cloudcompare.org.

que permanece significativa mesmo a 32,7 km da desembocadura, com altura de 1,18 m. (referente aos valores normalizados em relação à altura média no Ponto 3) representado pela linha vermelha (FIGURA 9).

As oscilações mantiveram regularidade ao longo do intervalo observado nos três pontos, sem alterações abruptas no padrão de variabilidade. A precipitação, ainda que expressiva em determinados eventos, mostrou-se intermitente e sem correlação direta com os picos de nível d'água, corroborando a dominância do regime de maré na dinâmica hidrológica do rio Guaraguaçu. A tendência de redução gradual da altura média da maré ao longo do curso do rio é evidente, o que é esperado à medida que se avança para montante, onde a energia da onda de maré é dissipada. Apesar disso, não se verifica resposta imediata ou amplificação significativa no nível d'água associada à precipitação. As oscilações seguem seu padrão regular, reforçando que a maré é o principal fator controlador do nível do rio em todo o período no trecho analisado durante a campanha 1, com valores de oscilação acima dos 5 cm Este resultado levou ao planejamento de uma nova campanha de campo, com a realocação dos sensores em pontos mais à montante em relação aos instalados na primeira campanha.

FIGURA 9 – OSCILAÇÃO DO NÍVEL DAS ÁGUAS NOS PONTOS 1 (LINHA PRETA, LOCALIZADO A 11,5 KM DA FOZ), PONTO 2 (SITUADO A 24,8 KM DA FOZ, LINHA VERDE) E PONTO 3 (SITUADO A 32,7 KM DA FOZ, LINHA VERMELHA) EM COMPARAÇÃO COM A PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO (COLUNA AZUL), (NOVEMBRO/2023 A JANEIRO/2024).

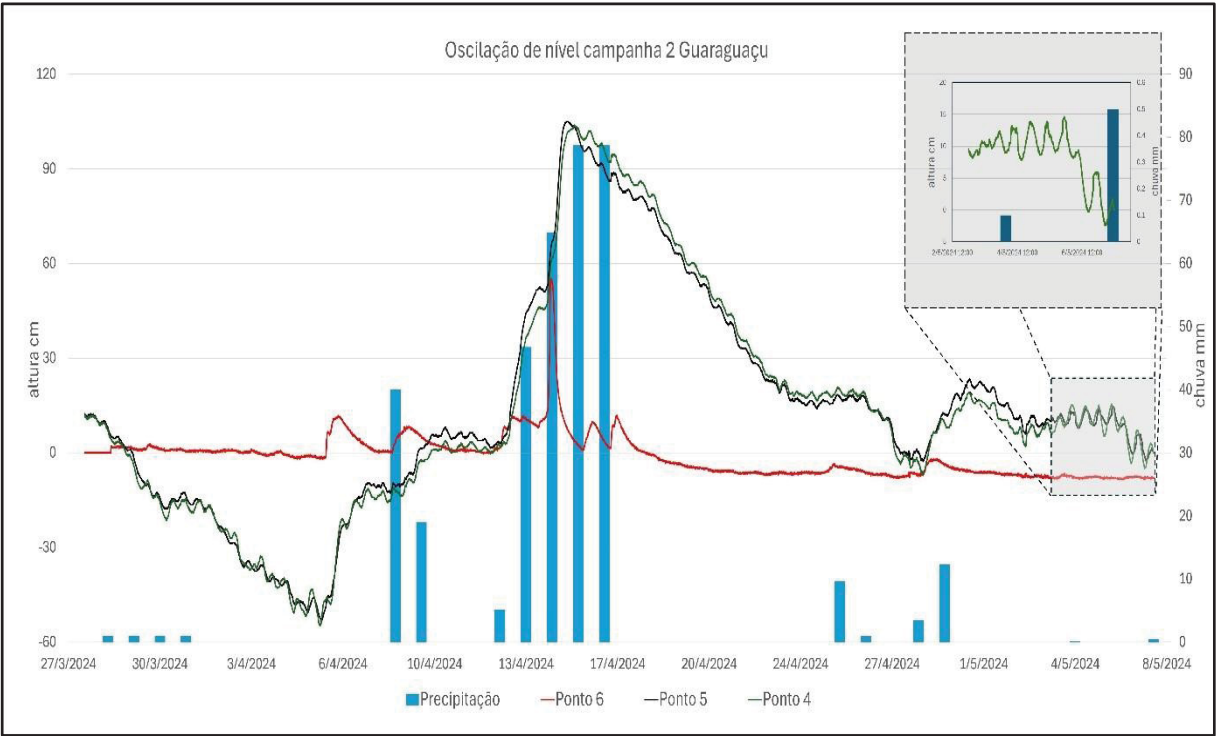


FONTE: autor (2024).

foi efetuada uma segunda campanha de coleta, realizada entre março e maio de 2024, onde foram monitorados três pontos adicionais (Pontos 4, 5 e 6) situados a montante daqueles analisados na campanha anterior. Nos Pontos 4 e 5, as oscilações são cíclicas, com alturas baixas.

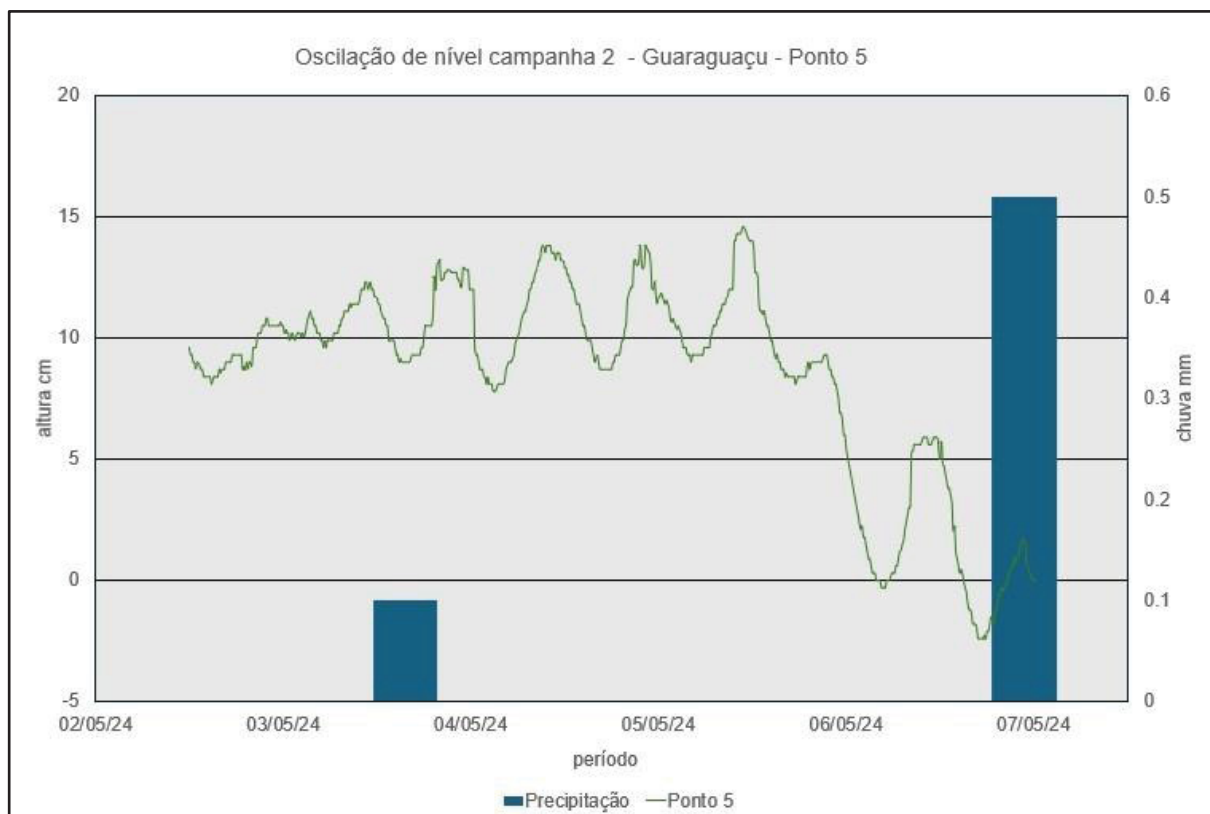
Os registros apresentam uma variabilidade semi-diurna característica da influência da maré, mais visível nos períodos de sizígia, comportamento análogo ao observado na primeira campanha nos Pontos 1, 2 e 3, ainda que com proeminente atenuação da altura. O destaque em zoom na FIGURA 10 (A) evidencia o efeito da maré no Ponto 5 durante o período da sizígia (entre 3 e 8 de maio de 2024), onde se observa a continuidade das oscilações de maré. A Figura 10 (B) apresenta esse mesmo trecho com zoom ampliado, permitindo visualizar com maior nitidez a continuidade da oscilação no Ponto 5 durante a sizígia. Tal evidência reforça as conclusões da primeira campanha: a maré penetra de forma significativa no Rio Guaraguaçu, sendo o principal agente modulador do nível da água até aproximadamente 45 km da foz.

FIGURA 10 (A) – VARIAÇÃO DO NÍVEL DAS ÁGUAS NOS PONTOS 4 (LINHA PRETA), PONTO 5 (LINHA VERDE) E PONTO 6 (LINHA VERMELHA) EM COMPARAÇÃO COM A PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO (COLUNA AZUL), (MARÇO/2024 A MAIO/2024) COM ZOOM DO REGISTRO DA OSCILAÇÃO EM 5 CM.



FONTE: autor (2024).

FIGURA 10 (B) – DETALHE DA OSCILAÇÃO EM 5 CM NO PONTO 5 DURANTE O CONDENSADO PARA O PERÍODO DA SIZÍGIA



FONTE: autor (2024).

Acima desta distância, como no caso do Ponto 6, os controles fluviais e pluviométricos passam a predominar com uma resposta hidrológica distinta dos pontos a jusante, com o nível da água mantendo-se praticamente constante, com pequenas flutuações associadas a episódios de precipitação local. A ausência de padrão oscilatório semelhante ao dos pontos mais a jusante demonstra que, neste ponto, a ação da maré já não exerce influência sobre a lâmina d'água indicando a existência de um regime hídrico exclusivamente fluvial.

Os resultados permitem inferir que, ao longo do trecho monitorado, a influência da maré apresenta um gradiente espacial bem definido. Nas regiões mais próximas à foz a maré domina o regime hidrodinâmico (Pontos 1, 2 e 3); nas regiões intermediárias, a influência da maré é perceptível, porém atenuada (Pontos 4 e 5); e, nas regiões superiores, o comportamento do nível d'água torna-se tipicamente fluvial Ponto (6). O rio Guaraguaçu apresenta características de sistemas de planície costeira, com baixa declividade longitudinal, canais sinuosos e presença significativa de áreas úmidas e vegetação marginal. Essa configuração geomorfológica favorece a

propagação contínua da maré, com baixa capacidade de reflexão de energia. As medições de nível d'água ao longo do curso fluvial evidenciam um padrão de atenuação gradual da altura da maré, condizente com uma onda progressiva, à medida que se avança para montante.

Conforme descrito por Noernberg *et al.* (2006), a baixa energia fluvial, aliada à morfologia do canal, permite que a maré se propague por longas distâncias no interior do sistema, com pouca interferência de ondas refletidas. O rio Guaraguaçu representa um exemplo prático de propagação progressiva, onde a região de transição entre os regimes de maré e fluvial está localizada no Ponto 5, local de registro da presença da influência da maré com oscilação de 5 cm. As informações, os resultados e conclusões sobre todos os pontos coletados ao longo das duas campanhas, estão compiladas na TABELA 6.

TABELA 6 – RESUMO COMPARATIVO DOS PONTOS NO RIO GUARAGUAÇU.

Ponto	Influência da maré	Resposta à precipitação	Oscilações do nível	Altura média das ondas de maré (cm)	Distância da Foz (km)	Conclusão
1	Muito Forte	Baixa	Cíclicas regulares e	133	11,5	Região estuarina com predomínio total da maré
2	Forte	Baixa	Cíclicas regulares, e	122	24,8	Área dominada pela maré, típica de zona costeira
3	Forte	Baixa	Cíclicas regulares e	118	32,7	Área dominada pela maré, típica de zona costeira
4	Moderada	Alta	Picos intensos logo após eventos de chuva	17	40,5	Região de transição maré-rio , mais afetada por chuva
5	Fraca	Muito alta	Picos intensos logo após eventos de chuva	5	44,8	Região de transição maré-rio , mais afetada por chuva
6	Inexistente	Muito alta	Picos intensos logo após eventos de chuva	0	48,1	Região puramente fluvial, sem maré

FONTE: O autor (2025).

Os dados obtidos da nuvem de pontos do levantamento LiDAR no Ponto 5 descritos no Capítulo 4.4, definiram a altitude elipsoidal do ponto onde foi registrada a oscilação em 5 cm. metros desse ponto (TABELA 7). Para determinar a altitude normal do local, foi utilizada a fórmula clássica da geodésia, conforme a equação $H = h - N$ (HOFMANN; WELLENHOF; MORITZ, 2006).

$$(H = h - N)$$

- H = altitude normal

- H = altitude elipsoidal
- N = fator geoidal obtido a partir do modelo de ondulação geoidal desenvolvido pelo IBGE para a conversão de altitudes geométricas para altitude normal.

TABELA 7 – CÁLCULO DA ALTITUDE NORMAL COM BASE NA ALTITUDE ELIPSOIDAL E FATOR GEOIDAL PARA O RIO GUARAGUAÇU.

Altitude elipsoidal (h) [m]	Fator geoidal (N) [m]	Altitude normal do Ponto 5 (H = h – N) [m]
1,987	0,210	1,777

FONTE: O autor (2025).

Após a cálculo da altitude do preamar médio de 1831, da medição da oscilação do nível das águas ao longo do rio Guaraguaçu, e da análise planialtimétrica, foi possível identificar com precisão, que o local onde a influência da maré oscila em 5 cm está situado no Ponto 5. A caracterização planialtimétrica está demonstrada em detalhe na Tabela 8.

TABELA 8 - DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO PLANIALTIMÉTRICA DA OSCILAÇÃO DA MARÉ EM 5 CM NO RIO GUARAGUAÇU.

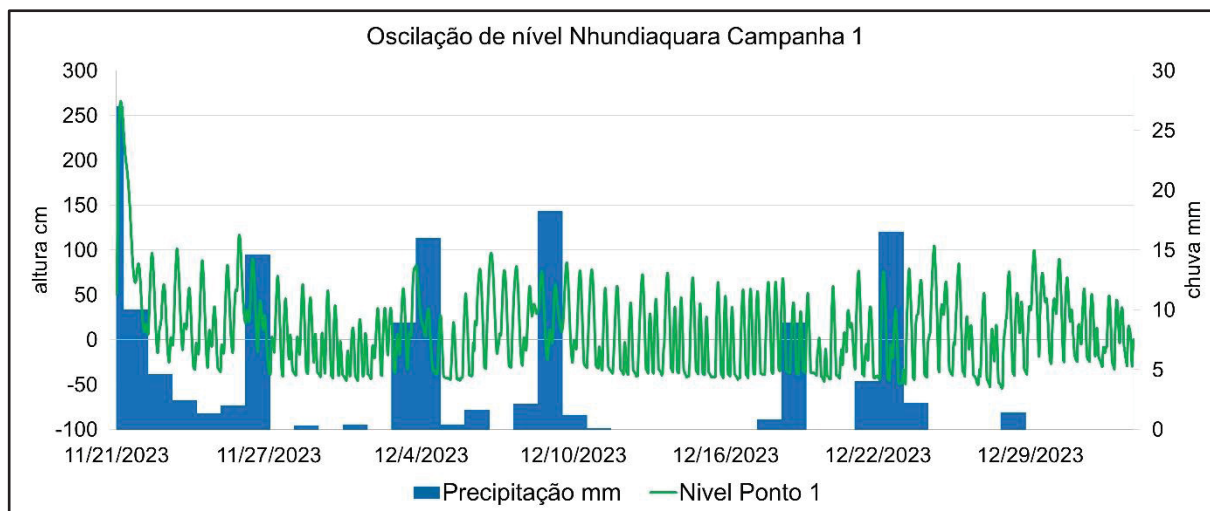
Ponto	UTM E	UTM S	Altitude normal (m)	Oscilação (cm)	Distância até a foz (km)
5	719816.00	7179850.00	1,777	5,00	44,861

FONTE: O autor (2025).

5.2 RIO NHUNDIAQUARA

A FIGURA 11 apresenta os dados registrados no Ponto 1 Nhundiaquara. O período de monitoramento abrange 39 (trinta e nove) dias, entre novembro de 2023 e janeiro de 2024. A série demonstra oscilações regulares ao longo do período mesmo em períodos de chuva, indicando influência predominante da maré com altura de 127 cm em média, mesmo com a presença de picos acentuados de precipitação o gráfico aponta que não houve variações significativas do comportamento oscilatório revelando um consistente predomínio da influência da maré. O nível das águas apresenta comportamento oscilatório cíclico ao longo de todo o período registrado, com flutuações semidiurnas regulares. A precipitação é intermitente e pontual com períodos de chuva moderada a forte, mesmo com essa intensidade só há uma correlação direta de forma evidente no gráfico com os picos no nível das águas no dia 21 de novembro.

FIGURA 11: CORRELAÇÃO ÁGUAS/PRECIPITAÇÃO EM NOVEMBRO A DEZEMBRO DE 2023. PONTO 1 NHUNDIAQUARA.



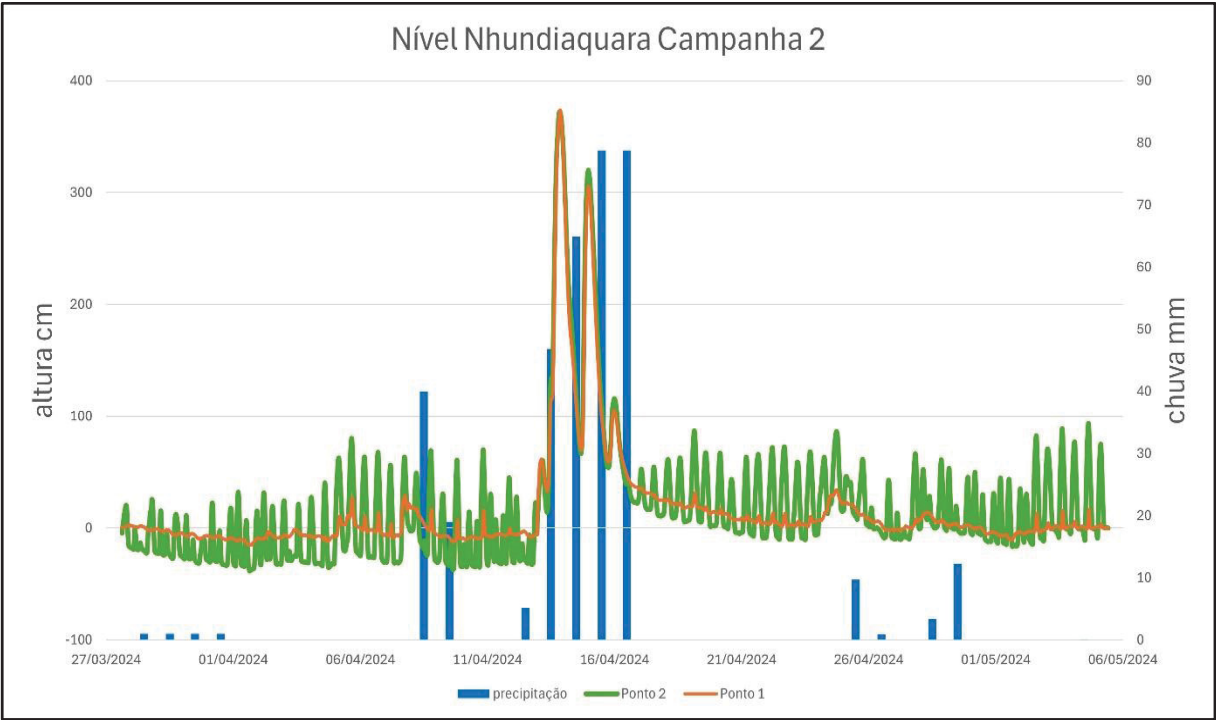
Fonte: O autor (2024).

A Figura 12 apresenta os registros de nível e precipitação nos Pontos 2 e 3 do rio Nhundiaquara, monitorados durante um período de 40 dias, entre março e maio de 2024. Os dados evidenciam comportamentos hidrológicos distintos entre os dois pontos, influenciados pela declividade e por sua localização e em relação à zona estuarina. No Ponto 2, observa-se uma influência moderada da maré, com oscilações médias de 63,0 cm, os maiores picos registrados em 08/04/2024 (63 cm) e 27/04/2024 (66 cm), coincidindo com o período de sizígia. A oscilação possui padrão cíclico semidiurno característico da atuação das marés, confirmando a presença de influência marítima neste trecho. Adicionalmente, episódios de precipitação intensa, com volumes superiores a 80 mm em meados de abril, coincidem com elevações significativas no nível d'água, sugerindo correlação direta entre eventos pluviométricos e intensificação das oscilações.

Em contraste, o Ponto 3, situado a 15,60 km da foz, distante apenas 0,60 km do Ponto 2, (Figura 12) não apresenta influência de maré, com comportamento hidrológico estável e variações no nível do rio associadas exclusivamente aos eventos de precipitação. As oscilações observadas neste ponto são pontuais e diretamente ligadas ao regime de chuvas. A comparação entre os dois pontos evidencia uma zona de transição ao longo do curso do rio, na qual a influência marítima se reduz gradualmente do Ponto 2 até desaparecer no Ponto 3. O comportamento oscilatório é semelhante quanto à resposta à precipitação, contudo, difere significativamente em

relação à presença de maré, bem marcada no Ponto 2, e ausente no Ponto 3. As informações, os resultados e as conclusões sobre todos os pontos coletados ao longo das duas campanhas, estão apresentadas na Tabela 9.

FIGURA 12: CORRELAÇÃO ÁGUAS/PRECIPITAÇÃO EM MARÇO A MAIO DE 2024. PONTO 1 NHUNDIAQUARA.



FONTE: O autor (2024).

TABELA 9 – RESUMO COMPARATIVO DOS PONTOS NO RIO NHUNDIAQUARA.

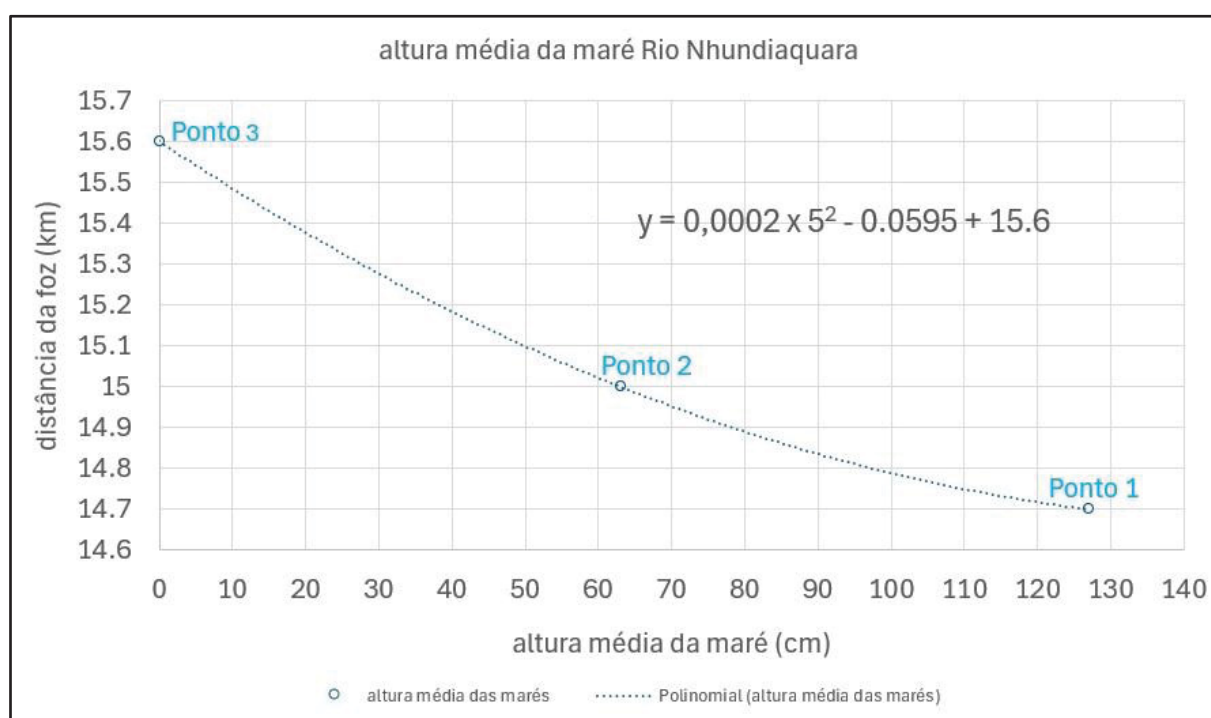
Ponto	Influência da maré	Resposta à precipitação	Oscilações do nível	Altura média das ondas de maré cm	Distância da Foz (km)	Conclusão
1	Forte	Baixa	Oscilações cíclicas e regulares,	127	14,7	Área dominada pela maré, típica de zona marítima
2	Moderada	Alta	Picos intensos após eventos de chuva	63	15	Área de domínio marítimo com influência moderada da maré
3	Inexistente	Muito alta	Picos intensos após eventos de chuva	0	15,6	Região puramente fluvial, sem maré

FONTE: O autor (2024).

O rio Nhundiaquara apresenta características típicas de rios serranos com declividade acentuada, velocidade da corrente fluvial elevada. Essas condições

dificultam a penetração da maré por longas distâncias e favorecem a reflexão parcial da energia da onda, em especial em estreitamentos naturais do canal. Desse modo, o rio Nhundiaquara constitui um caso representativo da dificuldade em adotar uma metodologia de leitura direta, exigindo o uso de métodos complementares para a determinação do limite da maré astronômica. Com isso, adotou-se um ajuste polinomial de segunda ordem (Figura 13) entre a altura média da maré e a distância.

FIGURA 13 – ALTURA MÉDIA DA MARÉ CONFORME AVANÇA A MONTANTE PARTINDO DA FOZ DO RIO NHUNDIAQUARA.



FONTE: O autor (2025).

A partir dessa relação foi possível determinar que a oscilação em 5 cm ocorre a 552,00 m a montante do Ponto 2, posicionado a 8,00 m antes do Ponto 3. A localização exata foi determinada por meio da correlação entre a declividade do terreno e a distância entre esses dois pontos. A conversão para uma altitude do sistema de referência altimétrico foi realizada com base nos dados do levantamento GNSS em modo RTK, coletados no espelho de água no momento da instalação do sensor, conforme descrito no item 4.3 da seção de Materiais e Métodos (Figura 7). Os valores utilizados no cálculo e os resultados obtidos estão detalhados na (TABELA 10).

TABELA 10 – CÁLCULO DA ALTITUDE NORMAL COM BASE NA ALTITUDE ELIPSOIDAL E FATOR GEOIDAL PARA O RIO NHUNDIAQUARA.

Altitude elipsoidal (h) [m]	Fator geoidal (N) [m]	Altitude normal do Ponto 5 (H = h – N) [m]
2,854	1,620	1,234

FONTE: Autor (2024).

Após a realização dos procedimentos de cálculo da altitude do preamar médio de 1831, da análise planialtimétrica e da medição da oscilação do nível da água ao longo do rio Nhundiaquara, identificou-se que o ponto onde a influência da maré atinge a altura de 5 cm localiza-se entre os Pontos 2 e 3 (TABELA 11). Com base nas relações analisadas, foi possível encontrar o trecho onde ocorre a transição entre os regimes marítimo e fluvial, distinção essencial para a caracterização hidrodinâmica da região e para futuras aplicações na delimitação de terrenos de marinha.

TABELA 11 - DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO PLANIALTIMÉTRICA DA OSCILAÇÃO DA MARÉ EM 5 CM NO RIO NHUNDIAQUARA.

Ponto	UTM E	UTM S	Altitude normal (m)	Oscilação (cm)	Distância até a foz (km)
Entre o 2 ao 3	745250.57	7148014.87	1,234	5,00	15,55

FONTE: O autor (2025).

5.3 DISCUSSÕES

O presente trabalho evidenciou a importância da integração entre dados coletados por sensores de pressão, aerolevantamento por LiDAR e altimetria GNSS para delimitação precisa da transição entre os domínios estuarino e fluvial nos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara. A metodologia adotada permitiu identificar de forma precisa o ponto de oscilação de maré de 5 cm, parâmetro fundamental para a demarcação dos terrenos de marinha conforme as diretrizes da Secretaria do Patrimônio da União (SPU). No entanto, algumas fragilidades técnicas devem ser consideradas no uso do LiDAR para coleta de altimetria.

Apesar da alta resolução e ampla cobertura, o LiDAR aerotransportado apresenta limitações em áreas com vegetação densa, como florestas tropicais. As copas das árvores interceptam grande parte dos pulsos, reduzindo os retornos do solo e comprometendo a precisão dos Modelos Digitais de Terreno, (GOMES *et al.*, 2016),

(REUTEBUCH *et al.*, 2005). Esse efeito se intensifica em regiões com dossel fechado e relevo acidentado, (TEIXEIRA *et al.*, 2022). A estrutura complexa da vegetação dificulta a detecção da superfície do terreno, gerando lacunas e distorções nos dados processados (SILVA *et al.*, 2021). Estudos na Amazônia confirmam que, sob múltiplas camadas vegetais, a proporção de retornos do solo é extremamente baixa, afetando diretamente a qualidade dos produtos LiDAR para a geração de MDT, (GOMES *et al.*, 2016), (TEIXEIRA *et al.*, 2022).

Além disso, o custo elevado e a dependência de condições climáticas favoráveis para a coleta dos dados aéreos representam limitações logísticas e financeiras, ainda mais quando se busca precisão centimétrica.

E se tratando de coleta de pontos de controle por GNSS embora o sistema proporcione alta precisão altimétrica, ele é suscetível à interferência de vários fatores, desde erros cometidos por posicionamento incorreto do equipamento até a disponibilidade de satélites e da qualidade do processamento pós-missão. Em relação a utilização de sensores de pressão para o monitoramento do nível d'água, existem vários aspectos que precisam ser abordados devido a possibilidade de apresentar erros, seja em função de sedimentos, incrustações biológicas, desgaste do aparelho, ou instalação inadequada. Já o cálculo por gradiente altimétrico linear embora prático, esse método assume linearidade do terreno entre os pontos de medição, o que nem sempre reflete a verdadeira topografia e hidrodinâmica reais do ambiente estudado não sendo recomendado para grandes distâncias ou em regiões heterogêneas (com declives abruptos).

Mais do que buscar um valor exato de oscilação da maré em cumprimento ao que estabelece a legislação vigente para a demarcação dos terrenos de marinha, este estudo evidenciou a complexidade de se definir limites territoriais com base em uma referência centimétrica tão dinâmica e sujeita a vários fatores. Essa constatação reforça a necessidade permanente por parte da SPU, de capacitação técnica das equipes envolvidas no trabalho demarcatório, bem como a ampliação de parcerias com instituições de ensino e da adoção de tecnologias mais avançadas, capazes de aumentar a precisão dos resultados. Tais medidas são fundamentais para o aprimoramento metodológico e institucional do processo de delimitação, promovendo maior segurança técnica, jurídica e ambiental na gestão e ocupação de áreas costeiras e estuarinas.

5.4 CONCLUSÕES

A análise integrada dos dados obtidos pelos sensores instalados ao longo do Rio Guaraguaçu e do Rio Nhundiaquara, associada ao aerolevanteamento com LiDAR e altimetria por meio de GNSS, representa um avanço na aquisição de dados altimétricos no setor público e está sendo testada para a delimitação de terrenos da União, especialmente para geração de MDT e na definição da altitude do ponto de influência das marés em locais inacessíveis. Essa integração permitiu evidenciar com clareza a transição entre os domínios estuarino, costeiro e fluvial. A combinação de técnicas possibilitou a identificação precisa da localização planialtimétrica do ponto em que a oscilação das marés astronômicas atinge 5 cm em ambos os rios. No rio Guaraguaçu, os Pontos 1, 2 e 3 estão posicionados em áreas sob influência direta dos ciclos de marés astronômicas, com oscilações no nível da água predominantemente relacionadas a esses ciclos e com baixa sensibilidade à precipitação, caracterizando ambientes estuarinos típicos. Os Pontos 4 e 5 indicaram um comportamento intermediário, evidenciando uma zona de transição gradual entre os ambientes marinho e fluvial. O Ponto 5 está localizado nas coordenadas UTM E 719816,00 / S 7179850,00 (Fuso 22 Sul, DATUM SIRGAS 2000). Nesse local, a altitude normal é de 1,777 m, onde foi registrada uma oscilação de maré de 5 cm, caracterizando o limite funcional entre os domínios fluvial e marítimo. O Ponto 6 apresentou um padrão hidrológico mais estável e isolado, com variações no nível da água exclusivamente relacionadas às chuvas, representando um ambiente unicamente fluvial. No Rio Nhundiaquara, os Pontos 1 e 2, estão sob forte influência da maré astronômica, e demonstraram resposta imediata às chuvas, caracterizando uma zona de interação mais dinâmica entre os fatores meteorológicos e marinhos. O Ponto 3 revelou comportamento tipicamente fluvial, com oscilações induzidas apenas por eventos de precipitação. O ponto onde a maré atinge 5 cm de oscilação foi identificada no trecho entre os Pontos 2 e 3, localizado nas coordenadas UTM E 745.250,57 / S 7.148.014,87 (Fuso 22 Sul, DATUM SIRGAS 2000). A altitude normal desse ponto é de 1,234 m, referenciada em altitude normal. A definição do local foi baseada em um modelo polinomial de segundo grau, que relaciona a oscilação da maré com a distância entre os pontos, sendo essencial para a delimitação do regime estuarino-fluvial.

O diagnóstico apresentado nesta pesquisa demonstra a robustez e a reprodutibilidade da metodologia adotada, possibilitando a sua aplicação em processos administrativos de demarcação de terrenos de marinha conduzidos pela Secretaria do Patrimônio da União (SPU). Os resultados obtidos revelam a importância da instrumentação distribuída ao longo do gradiente hidrográfico para a caracterização precisa da dinâmica hidrológica regional, especialmente em sistemas estuarinos sob regime misto de influência marinha e fluvial.

A abordagem desenvolvida nesta dissertação oferece subsídios técnicos consistentes para a delimitação entre bens públicos e propriedades privadas, contribuindo de forma significativa para a adequada gestão fundiária, o ordenamento territorial e o planejamento ambiental em áreas sob jurisdição da União. Além disso, a metodologia propõe um procedimento tecnicamente fundamentado, transparente e juridicamente embasado para a definição do limite da influência da maré, conforme estabelecido no Decreto-Lei nº 9.760/1946. A Tabela 12, apresentada ao final deste capítulo, sintetiza as coordenadas UTM (DATUM SIRGAS 2000, Fuso 22 Sul) e as respectivas altitudes normais associadas aos pontos em que se observou a oscilação com altura de 5 cm no nível das águas causada por influência da maré astronômica, nos rios Guaraguaçu e Nhundiaquara.

Contudo, reconhecemos as limitações do estudo, particularmente no que se refere à adoção de critérios complementares que possam refinar os resultados. Entre os aspectos passíveis de aprimoramento, destacam-se: a ampliação do período de monitoramento com séries históricas de marés; a calibração cruzada entre sensores; a integração de modelagens numéricas hidrodinâmicas. Esses e outros aprimoramentos encontram-se detalhados (ver seção 5.5 Recomendações para Trabalhos Futuros). Dessa forma, embora os resultados apresentados representem um avanço expressivo na delimitação técnica da LPM/1831, abrem-se perspectivas promissoras para estudos futuros que visem o aprofundamento e complementação da abordagem metodológica proposta.

TABELA 12 – LOCALIZAÇÃO DA OSCILAÇÃO EM 5 CM DA MARÉ NOS RIOS GUARAGUAÇU E NHUNDIAQUARA.

RIO	PONTO	UTM E	UTM S	ALTITUDE NORMAL (m)	OSCILAÇÃO CM	DISTÂNCIA ATÉ A FOZ (KM)
Guaraguaçu	5	719816.00	7179850.00	1,777	5,00	44,861
Nhundiaquara	2 ao 3	745250.57	7148014.87	1,234	5,00	15,55

Fonte: Autor (2024).

5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as limitações apresentadas, são propostas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Expansão temporal da coleta de dados: Monitorar os níveis de água em períodos sazonais distintos para avaliar a influência de variações climáticas e hidrológicas ao longo do ano.
- Calibração cruzada entre os equipamentos: Desenvolver rotinas de calibração entre sensores de pressão, GNSS e LiDAR para redução de incertezas e aumento da acurácia dos resultados.
- Aplicabilidade da metodologia em outras bacias hidrográficas: Replicar a metodologia em diferentes regiões para testar sua robustez em contextos geomorfológicos variados.
- Integração com modelos numéricos hidrodinâmicos: Complementar os dados observacionais com simulações computacionais que permitam prever a propagação de maré em diferentes cenários.
- Ampliação dos parâmetros medidos: Incluir sensores de salinidade, temperatura e condutividade para enriquecer a interpretação da dinâmica de transição marinho-fluvial.
- Análise jurídica aplicada: Realizar estudos interdisciplinares que considerem os impactos legais e sociais da delimitação com base em critérios técnicos atualizados, e até a possível adequações legislativas para valores mais elevados que os 5 cm atuais.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- ANGULO, R. J. Evolução geomorfológica da planície costeira do Estado do Paraná durante o Quaternário. 1986. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- ANGULO, R. J. Estuários da planície costeira: morfodinâmica e sedimentação. In: Geologia do Quaternário Litorâneo do Brasil. Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986.
- ASPRS. *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2014. Disponível em: https://www.asprs.org/wpcontent/uploads/2015/01/ASPRS_Positional_Accuracy_Standards_Edition1_Version100_November2014.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946. Dispõe sobre os bens imóveis da União. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 set. 1946. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del9760.htm. Acesso em: 6 mai. 2025.
- BRITEZ, F. F. In: LAGEAMB – Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental da UFPR. *Caderno de Cobertura Vegetal: Técnicas de classificação, mapeamento e validação*. Curitiba: LAGEAMB/UFPR, 2019. Disponível em: <https://lageamb.ufpr.br/wp-content/uploads/2019/05/CadernoCOberturaVegetal.pdf>. Acesso em: [21 de julho de 2025].
- BROWN, J. Tides. In: OPEN UNIVERSITY. ARTS FOUNDATION COURSE TEAM. Waves, tides and shallow-water processes. Oxford: Pergamon Press, 1989. cap. 2, p. 43–66.
- BUSCHMAN, Frans A.; HOITINK, A. J. F.; DE JONG, Steven M.; HOEKSTRA, Pieter; HIDAYAT, H.; SASSI, M. G. Observations of water and sediment transport in the tropical semidiurnal tidal river Mahakam in Indonesia. *Marine Geology*, [S. l.], v. 269, n. 3–4, p. 171–184, 2010. DOI: 10.1016/j.margeo.2009.12.005.
- BUSCHMAN, Frans A.; HOITINK, A. J. F.; HOEKSTRA, P.; MIDDELKOOP, H. Seasonal water and salt dynamics in a mangrove creek system. *Journal of Hydrology*, [S. l.], v. 400, p. 1–13, 2011. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.012.
- CARRILHO, João Carlos. *Dinâmica sedimentar do fundo estuarino adjacente ao canal de acesso ao Porto de Paranaguá e sua influência na operação portuária*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/48817>. Acesso em: 07 ago. 2025.
- CATTANI, E.; LAMOUR, M. R. A dinâmica sedimentar do estuário de Paranaguá. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 68, p. 41–60, 2011.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). Ficha maregráfica da estação Marina do Poço (60148). Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2025.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). Fichas maregráficas e constantes harmônicas. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2025.

CLOUDCOMPARE. CloudCompare (version 2.12) [GPL software]. 2024. Disponível em: <https://www.danielqm.net/cc/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DALBONE, J. Análise das componentes harmônicas da maré em estuários brasileiros. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DALBONE, A. R. Influência da propagação da maré na hidrodinâmica e transporte de sedimentos no estuário do Rio Itajaí-Açu. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

DAVIES, J. L. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeit. f. Geomorph.*, 8:27-142.

DEFANT, A. *Physical Oceanography*. Vol. 2. Oxford: Pergamon Press, 1961.

DYER, K. R. *Estuaries: a physical introduction*. 2. ed. Chichester: Wiley, 1997.

FAIRBRIDGE, R. W. The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: OLAUSSON, E.; CATO, I. (ed.). *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. New York: Wiley, 1980. p. 1–35.

FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análise e previsão*. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1997. 265 p.

GALLO, M. N. Marés. In: PEREIRA, R. C.; SOARES-GOMES, A. (org.). *Biologia marinha*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 87–98.

GALLO, Marcos N.; VINZON, S. B. Estudo simplificado da propagação da maré em rios e estuários: caso de estudo Rio Amazonas. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 15., 2003, Curitiba. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2003.

GALLO, M. N.; VINZON, S. B. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, v. 55, p. 441–448, 2005.

GOOGLE EARTH. Imagem de satélite da região estuarina de Paranaguá. 2024. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 6 maio 2025.

HARARI, J.; CAMARGO, R. de. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 42, n. 1–2, p. 35–54, 1994.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. *Physical Geodesy*. 2. ed. Wien: Springer-Verlag, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2022: população dos municípios brasileiros. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 6 maio 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sistema de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 6 maio 2025.

IBGE. Serviço de Posicionamento por Ponto Preciso – PPP. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Disponível em: <https://ppp.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

KJERFVE, B. Classification of estuaries. In: PERILLO, G. M. E. (ed.). Amsterdam: Elsevier, 1990. p. 1–35.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOUSADA, E. M. O. Estudos de hidrodinâmica do estuário de Paranaguá: marés e correntes. Curitiba: UFPR, 2001.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. The Subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: SEELIGER, U.; KJERFVE, B. (eds.). Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin: Springer, 2001. p. 131–145.

MALLET, C.; BRETAR, F. Full-waveform topographic LiDAR: state-of-the-art. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 64, n. 1, p. 1–16, 2009. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007.

MANTOVANELLI, G. A. Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem. 1999. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

MANTOVANELLI, A. et al. Circulação residual e transporte de sal no complexo estuarino de Paranaguá. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 9, n. 1, p. 41–56, 2004.

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. 1997.

MELLO, Thiago de. Poesia comprometida com a minha e a tua vida. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1975.

MIRANDA, L. B. de. Fundamentos de oceanografia física. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2002.

MIRANDA, L. B. de. Circulação e processos de mistura em estuários. In: ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B.; MADUREIRA, L. S. P. (org.). O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo: EDUSP, 2006. p. 71–92.

NGUYEN, A. D. Tidal dynamics in highly branching estuaries. 2008. Tese (Doutorado) – UNESCO-IHE, Delft University of Technology, Países Baixos, 2008.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. The effect of land cover and geomorphologic features on the tidal channel system of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 190–193, 2004.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. Caracterização da circulação de fundo no estuário de Paranaguá (PR). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 4, p. 5–20, 2004.

NOERNBERG, M. A. et al. Remote sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá Estuarine Complex - Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, n. 39, p. 1627-1631, 2006.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. Correntes costeiras e transporte de sedimentos nos canais de navegação do Estuário da Baía de Paranaguá. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 60, 2007. DOI: 10.5380/geo.v60i0.9616. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/9616>. Acesso em: 16 mai. 2025.

POND, S.; PICKARD, G. L. *Introductory dynamical oceanography*. Oxford: Pergamon Press, 1983.

PRITCHARD, D. W. What is an estuary: physical viewpoint. In: LAUFF, G. H. (ed.). *Estuaries*. Washington: American Association for the Advancement of Science, 1967. p. 3–5. (AAAS Publication, 83).

PUGH, D. T. *Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists*. Chichester: John Wiley & Sons, 1987.

SLATTON, K. C.; ROTH, B. M.; CARTER, W. E.; SHRESTHA, R. L. Airborne laser swath mapping: achieving the resolution and accuracy of airborne laser altimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45, n. 9, p. 3044–3054, 2007.

SOLINST. Solinst Levellogger 5 Junior – User Guide. Georgetown, Canadá: Solinst, 2024. Disponível em: <https://www.solinst.com>. Acesso em: 6 mai. 2025.

TAROLLI, P.; ARROWSMITH, J. R.; VIVONI, E. R. Understanding Earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. *Geomorphology*, v. 113, n. 1–2, p. 1–3, 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.07.005.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). Acórdão nº 1286/2021 – Plenário. Brasília: TCU, 2021. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 22 fev. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Laboratório de Geoprocessamento e Estudos Ambientais – LAGEAMB. Feições pioneiras com influência marinha – IDE UFPR. Curitiba: LAGEAMB/UFPR, 2023. Disponível em: <https://ide.lageamb.ufpr.br/catalogue/#/dataset/164>. Acesso em: 23 jul. 2024.

UFPR – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Laboratório de Topografia e Geodésia da CPP-CEM. Curitiba, 2025. Dados internos.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; PARK, D. *Waves, tides and shallow-water processes*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann/The Open University, 1999.