



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O
MONITORAMENTO DE DADOS METEOCEANOGRÁFICOS NA
ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada por:

DANIEL DA SILVA SOTÃO

Orientado por: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

**BELÉM – PARÁ
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O
MONITORAMENTO DE DADOS METEOCEANOGRÁFICOS NA
ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada por:

DANIEL DA SILVA SOTÃO

Orientado por: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

**BELÉM – PARÁ
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S717a Sotão, Daniel da Silva.
Aplicabilidade de um sistema de baixo custo para o
monitoramento de dados meteoceanográficos na zona costeira
Amazônica / Daniel da Silva Sotão, . — 2025.
xiv, 55 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em
Oceanografia, Belém, 2025.

1. Processamento de dados. 2. Monitoramento ambiental.
3. Parâmetros físicos e oceanográficos. 4. Zona Costeira
Amazônica. 5. Amazônia. I. Título.

CDD 620.00285



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia

APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO DE DADOS METEOCEANOGRÁFICOS NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

Dissertação apresentada por:

DANIEL DA SILVA SOTÃO

Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Oceanografia na Área de SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS e Linha de Pesquisa PROCESSOS EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

Data de Aprovação: 23 / 04 / 2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENAN PEIXOTO ROSARIO
Data: 18/06/2025 17:13:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário
(Orientador – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEILANHE ALMEIDA RANIERI
Data: 18/06/2025 16:38:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leilanne Almeida Ranieri
(Membro – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br ADONIS FERREIRA RAIOL LEAL
Data: 19/06/2025 07:08:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adônis Ferreira Raiol Leal
(Externo – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br VANDO JOSE COSTA GOMES
Data: 18/06/2025 16:21:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vando José Costa Gomes
(Externo – UFPA)

Aos meus pais, irmãos, amigos e
namorada, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

À Deus por ter me dado forças e perseverança diante de todos os obstáculos percorridos até o final do mestrado.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional e incentivo constantes desde o início da graduação até este momento decisivo da minha trajetória acadêmica.

À minha companheira, Ísis de Nazaré, pelo amor, compreensão e presença constante. Seu apoio total e incondicional foi fundamental em cada etapa desta caminhada. Que o destino nos permita compartilhar muitos outros capítulos da vida, lado a lado.

Aos meus amigos de longa data — Victor Silva, Leonardo Rocha, Andrey Leandro e Leandro Franco — por estarem comigo durante toda a minha formação acadêmica, oferecendo amizade, escuta e força nos momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos da graduação que seguiram comigo no mestrado, Fabrício Figueiredo, Marco Callado e João Vitor, minha gratidão pela parceria e companheirismo. Tornaram essa jornada muito mais leve e significativa.

Ao meu orientador, Renan Peixoto Rosário, por acreditar no meu potencial, pelo apoio à pesquisa e por todos os ensinamentos compartilhados ao longo desses anos. Sua orientação foi essencial para a concretização deste trabalho.

Ao Observatório da Costa Amazônica – OCA, por dar visibilidade e acreditar no potencial da minha pesquisa.

Aos meus amigos do Laboratório de Oceanografia Física por todos os momentos juntos desde a inauguração do novo laboratório até os dias de hoje. Em especial, aos meus amigos Guilherme Borges e Larissa Rosário por terem me ajudado em todas as fases da pesquisa. Sem vocês, a realização desta pesquisa teria sido muito mais difícil e desafiadora.

À Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas – FAPESPA, pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de mestrado, que viabilizou a dedicação integral ao desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal do Pará e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia pelo ambiente acadêmico e pela oportunidade de desenvolver ciência em uma região tão importante como a Zona Costeira Amazônica.

“Não se trata de mudar o mundo. Trata-se de
fazer o nosso melhor para deixá-lo como está.
Trata-se de respeitar a vontade dos outros e
acreditar na sua própria”

Big Boss - Metal Gear Solid 4

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e validar um Protótipo de Monitoramento Contínuo (PMC) de baixo custo, para coletar dados meteoclimatológicos na Zona Costeira Amazônica (ZCA), região vulnerável às mudanças climáticas e com lacunas de dados ambientais. O sistema, desenvolvido com um microcontrolador ESP32, integra sensores de temperatura e umidade relativa do ar (HDC1080 e AM2302), pressão atmosférica (BMP280 e MS5611), temperatura da água (DS18B20), nível da maré (HC-SR04), precipitação, velocidade e direção do vento. Os sensores foram validados comparando seus dados com uma estação meteorológica CICLUS PRO (EMC) e um registrador Sonlist Levellogger 5 LTC (CTDlog), ambos utilizados como referência. O PMC realizou quatro campanhas de testes em conjunto com o EMC e CTDlog, totalizando 56.221 registros. Os dados foram submetidos à regressão linear para desenvolver equações de calibração para cada sensor. A qualidade dos modelos de calibração foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), correlação de Pearson e análise residual. Os sensores HDC1080 e AM2302 mostraram excelente desempenho na medição de temperatura, com $R^2 > 0,9$, RMSE $< 0,2$ °C e residual absoluto médio (RAM) $< 0,12$ °C, e correlação de Pearson muito forte ($r \geq 0,9$). No entanto, demonstraram instabilidade na medição da umidade relativa do ar ($R^2 \approx 0,64$; RMSE $\approx 3,46\%$; RAM $\approx 2,52\%$). O desempenho dos sensores de pressão BMP280 e MS5611 foi inicialmente comprometido pelo aquecimento interno do PMC, mas após compensação térmica, obtiveram R^2 entre 0,88 e 0,99, RMSE entre 0,17 e 0,45 hPa e RAM entre 0,11 e 0,34 hPa, com destaque para o BMP280. O sensor DS18B20 apresentou correlação muito forte, $R^2 \approx 0,94$, RMSE $\approx 0,036$ °C e RAM $\approx 0,021$ °C, sendo altamente promissor. O HC-SR04 destacou-se como o melhor entre todos, com $R^2 \approx 0,99$, RMSE $\approx 2,6$ cm e RAM $\approx 1,9$ cm. Sensores de precipitação e de vento apresentaram inconsistências, exigindo testes adicionais. O custo total de produção do PMC foi de R\$ 952,75, refletindo economia de 86,19% em relação à EMC (R\$ 6.897,00) e 96,14% frente ao CTDlog (R\$24.677,29). Comparando o PMC a equipamentos equivalentes, obteve-se economia de no mínimo 66,33% em relação às estações básicas e 87,3% frente a registradores de temperatura e nível da água mais econômicos. O PMC demonstrou ser uma solução viável, econômica e replicável para o monitoramento ambiental contínuo na ZCA, com potencial de preencher lacunas existentes nas redes de observação, embora melhorias ainda sejam necessárias para aprimorar seu desempenho a longo prazo.

Palavras-chave: processamento de dados; monitoramento ambiental; parâmetros físicos e oceanográficos; Zona Costeira Amazônica; Amazônia.

ABSTRACT

This study aimed to develop, implement, and validate a low-cost Continuous Monitoring Prototype (CMP) to collect meteoceanographic data in the Amazon Coastal Zone (ACZ), a region vulnerable to climate change and lacking environmental data. The system, built with an ESP32 microcontroller, integrates sensors for air temperature and relative humidity (HDC1080 and AM2302), atmospheric pressure (BMP280 and MS5611), water temperature (DS18B20), tide level (HC-SR04), precipitation, and wind speed and direction. Sensor validation was performed by comparing the collected data with reference equipment: a CICLUS PRO weather station (CWS) and a Sonlist Levelogger 5 LTC recorder (CTDlog). The CMP conducted four joint test campaigns with the CWS and CTDlog, totaling 56,221 records. Linear regression was applied to develop calibration equations for each sensor. Calibration quality was assessed using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), Pearson correlation coefficient, and residual analysis. The HDC1080 and AM2302 sensors showed excellent performance for temperature measurement, with $R^2 > 0.9$, $RMSE < 0.2$ °C, mean absolute residual (MAE) < 0.12 °C, and very strong Pearson correlation ($r \geq 0.9$). However, they exhibited instability in relative humidity measurements ($R^2 \approx 0.64$; $RMSE \approx 3.46\%$; $MAE \approx 2.52\%$). The performance of the BMP280 and MS5611 pressure sensors was initially affected by internal heating, but after thermal compensation, they achieved R^2 values between 0.88 and 0.99, RMSE from 0.17 to 0.45 hPa, and MAE from 0.11 to 0.34 hPa, with the BMP280 showing superior performance. The DS18B20 water temperature sensor showed very strong correlation, with $R^2 \approx 0.94$, $RMSE \approx 0.036$ °C, and $MAE \approx 0.021$ °C, proving highly promising. The HC-SR04 sensor stood out as the most accurate, with $R^2 \approx 0.99$, $RMSE \approx 2.6$ cm, and $MAE \approx 1.9$ cm. Precipitation and wind sensors presented inconsistencies and require further testing. The total production cost of the CMP was BRL 952.75, representing savings of 86.19% compared to the CWS (BRL 6,897.00) and 96.14% compared to the CTDlog (BRL 24,677.29). When compared to equivalent equipment, the CMP achieved at least 66.33% cost reduction compared to basic stations and 87.3% compared to lower-cost temperature and water level recorders. The CMP proved to be a viable, economical, and replicable solution for continuous environmental monitoring in the ACZ, with the potential to fill existing gaps in observation networks, although improvements are still needed to enhance its long-term performance.

Keywords: data processing; environmental monitoring; physical and oceanographic parameters; Amazon Coastal Zone; Amazon

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Fonte: Autor.....	4
Figura 2 – Localização dos marégrafos da zona costeira amazônica administrados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Fonte: Autor.	5
Figura 3 – Localização das estações de amostragem do Observatório da Costa Amazônica (OCA). Fonte: (Franz <i>et al.</i> 2021).....	6
Figura 4 – Exemplo esquemático de um sistema embarcado. Fonte: Autor.....	13
Figura 5 – Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit. Fonte: (Eletrogate 2018).....	15
Figura 6 – Sensores de temperatura e umidade relativa (a) HDC1080 e (b) AM2302. Fonte: Adaptado de Teixeira (2019) e Arduino e Cia (2018).....	16
Figura 7 – Sensores de pressão barométrica (a) MS5611 e (b) BMP280. Fonte: Adaptado de Alam (2023) e Guse (2024).....	17
Figura 8 – Sensor de temperatura DS18B20. Fonte: (Thomsen 2015).	18
Figura 9 – Sensor ultrassônico HC-SR04. Fonte: Adaptado de Alam (2025).	18
Figura 10 – Esquemático 3D de: (a) pluviômetro com abrigo meteorológico na parte inferior; e (b) anemômetro (parte superior) e veleiro (parte inferior). Fonte: Autor.....	19
Figura 11 – Sensor rotativo de efeito hall AS5600. Fonte: Adaptado de Usinainfo (2025).	19
Figura 12 – Protótipo de monitoramento contínuo (PMC). Fonte: Autor.	21
Figura 13 – Registrador de condutividade, temperatura e nível da água Sonlist Levelogger 5 LTC. Fonte: (AgSolve 2025).....	24
Figura 14 – Estação meteorológica CICLUS PRO utilizada como dados de referência. Fonte: Autor.....	25
Figura 15 – Teste do sensor de nível HC-SR04 no trapiche da Universidade Federal do Pará. Fonte: Autor.....	26
Figura 16 – Teste do protótipo de monitoramento contínuo (PMC) em área arborizada. PMC à esquerda e Estação de referência (EMC) à direita. Fonte: Autor.	27
Figura 17 – Estação meteorológica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Fonte: (Ufpa 2017).....	27

Figura 18 – Local de instalação do protótipo de monitoramento contínuo (PMC). Fonte: Autor.	29
Figura 19 – Estação meteorológica de referência (EMC) à esquerda e o protótipo de monitoramento contínuo (PMC) à direita. Fonte: Autor.	29
Figura 20 – Posicionamento do sensor ultrassônico (HC-SR04) para medir nível do mar. Fonte: Autor.	30
Figura 21 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de temperatura do ar. (a) Gráfico de dispersão do sensor AM2302 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor AM2302, com média = 0,11 °C e máxima = 1,26 °C. (c) Gráfico de dispersão do sensor HDC1080 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HDC1080, com média = 0,09 °C e máxima = 1°C. Fonte: Autor.	32
Figura 22 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de umidade relativa do ar. (a) Gráfico de dispersão do sensor AM2302 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor AM2302, com média = 2,52 % e máxima = 16,75 %. (c) Gráfico de dispersão do sensor HDC1080 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HDC1080, com média = 2,39% e máxima = 17,08%. Fonte: Autor.	34
Figura 23 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de pressão barométrica. (a) Gráfico de dispersão do sensor BMP280 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor BMP280, com média = 0,50hPa e máxima = 2,41hPa. (c) Gráfico de dispersão do sensor MS5611 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor MS5611, com média = 0,60hPa e máxima de 3.53hPa. Fonte: Autor.	36
Figura 24 – Influência da temperatura interna sobre o erro dos sensores de pressão barométrica. (a) Regressão linear do MS5611. (b) Regressão polinomial de segunda ordem do BMP280. Fonte: Autor.	36
Figura 25 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de pressão barométrica após aplicado a correção térmica. (a) Gráfico de dispersão do sensor BMP280 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor BMP280, com média = 0,11hPa e máxima = 0,77hPa. (c) Gráfico de dispersão do sensor MS5611 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor MS5611, com média = 0,34hPa e máxima de 2,02hPa. Fonte: Autor.	37

- Figura 26 – Resultado do sensor de temperatura da água. (a) Gráfico de dispersão do sensor DS18B20 e do CTDlog. (b) Erro absoluto do sensor DS18B20 em relação ao CTDlog, com média = 0,12 °C e máxima = 0.5 °C. (c) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor DS18B20, com média = 0,021 °C e máxima = 0.376 °C. Fonte: Autor. 39
- Figura 27 – Resultado do sensor de nível da água. (a) Gráfico de dispersão do sensor HC-SR04 e do CTDlog. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HC-SR04, com média = 0,019 m e máxima = 0,175 m. Fonte: Autor. 40
- Figura 28 – Ilustração de duas possíveis instalações do PMC de acordo com o método de medição da variação da maré: (a) uso de um sensor ultrassônico em um trapiche e (b) o uso de um sensor de pressão hidrostática, sendo mais adequado para locais sem infraestrutura adequada. Fonte: Autor. 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tabela de custos de produção do equipamento. Custos de mão de obra não estão inseridos. Valores cotados em março de 2025 e não incluem frete e impostos.	22
Tabela 2- Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis.	23
Tabela 3- Quantidade de dados coletados durante cada teste.	26
Tabela 4- Custos de modelos de estações meteorológicas disponíveis no mercado e sua diferença de preço em relação ao custo de produção do PMC (R\$ 952,75). Valores cotados em março de 2025 e não incluem frete e impostos.	44
Tabela 5- Custos de equipamentos disponíveis no mercado para coletar temperatura e nível da água e sua diferença de preço em relação ao custo de produção do PMC (R\$ 952,75). Valores cotados em maio de 2023 e não incluem frete e impostos.	45

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO	8
2.1 OBJETIVO GERAL	8
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	8
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
3.1 ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA.....	9
3.2 MONITORAMENTO METEOCEANOGRÁFICO DE BAIXO CUSTO.....	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 PROTÓTIPO.....	15
4.1.1 Sensores.....	15
4.1.2 Sistema de alimentação e gerenciamento de energia	20
4.1.3 Sistema de armazenamento de dados.....	20
4.1.4 Montagem, programação e custos de produção	21
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
4.2.1 Validação e calibração dos sensores	23

4.2.2 Experimentos em campo.....	25
4.2.3 Local de instalação final	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 EVENTUALIDADES OCORRIDAS DURANTE O PERÍODO DE TESTES.....	31
5.2 DESEMPENHO DOS SENSORES	31
5.2.1 Sensor de temperatura do ar.....	31
5.2.2 Sensor de umidade relativa	33
5.2.3 Sensor de pressão atmosférica	35
5.2.4 Sensor de temperatura da água	38
5.2.5 Sensor de nível da água	39
5.3 APLICABILIDADE E SUSTENTABILIDADE.....	41
5.4 CUSTOS E VIABILIDADE	43
6 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas se tornaram o tema central de diversas nações que observam seu impacto direto no desenvolvimento econômico, cuja causa principal está relacionada ao aquecimento global, sendo este impulsionado pela emissão de gases do efeito estufa, tendo o dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) como protagonistas do aumento da temperatura global (Ipcc 2023). Segundo o relatório do IPCC¹ de 2023, a temperatura da superfície global atingiu, durante 2011-2020, 1,1 °C acima dos valores monitorados em 1850-1900. Esta nova margem, alcançada devido ao desmatamento, uso insustentável de terras, energia e padrões de consumo, desencadearam diversos problemas globais como a insegurança alimentar e hídrica (Gelfan 2023, Siwar *et al.* 2013), perda de biodiversidade (Habibullah *et al.* 2022, Mantyka-Pringle *et al.* 2015), ondas de calor extremas, altas taxas de precipitação, secas e aumento do nível do mar (Griggs & Reguero 2021, Walsh *et al.* 2012), causando grandes impactos em diversos setores econômicos como agricultura, pesca e turismo. Porém, as regiões mais afetadas são aquelas desprovidas de monitoramento e políticas públicas voltadas para a conservação e proteção ambiental e social.

Embora o Brasil seja um país emergente, ou seja, em desenvolvimento, muitas áreas povoadas carece de ações socioambientais efetivas, como comunidades da Zona Costeira Amazônica (ZCA). A ZCA se estende por mais de 1000 km de litoral, equivalendo a aproximadamente 10% do litoral brasileiro (9200 km) (Dominguez 2009), e abriga 56,6% do total de manguezais no país (Souza-Filho 2005), o que a torna uma região de grande importância ambiental. Os manguezais possuem um papel importante para o meio ambiente e à humanidade, sendo essenciais para a proteção da linha de costa, graças às formações das raízes que atenuam os processos erosivos causados pelo avanço das ondas e maré; são um grande sumidouro natural de gases do efeito estufa, contribuindo para o sequestro de carbono; desempenham grande importância na produção primária da zona costeira devido à grande quantidade de matéria orgânica produzida; e são áreas de repouso para aves endêmicas além de serem grandes berçários de espécies de peixes, moluscos e crustáceos (Souza *et al.* 2017).

Diante disso, os manguezais presentes na ZCA são de vital importância para várias comunidades ribeirinhas e povos tradicionais que dependem desse ambiente, tendo seu estilo de vida baseado no extrativismo, como agricultura, ostreicultura e pesca de peixe e caranguejo

¹ Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(Fernandes *et al.* 2018, Oliveira 2012, Owuor *et al.* 2024). Contudo, seus territórios e modo de vida estão constantemente sendo ameaçados pelas atividades antrópicas e mudanças climáticas.

Como dito anteriormente, a variação dos padrões climáticos ocasionados pela emissão de CO₂ estão aumentando a temperatura dos oceanos. O aumento da temperatura das águas dos manguezais amazônicos resultará em alterações fisiológicas como reprodução e crescimento de várias espécies de peixes e ostras importantes para a subsistência das comunidades ribeirinhas (Ficke *et al.* 2007, Neokye *et al.* 2024). Também, o aumento da temperatura nesse tipo de ambiente diminuirá ainda mais a concentração de oxigênio dissolvido (Ficke *et al.* 2007, Kundzewicz & Krysanova 2010), visto que os manguezais possuem grandes quantidades de material orgânico em decomposição (Souza *et al.* 2017), tornando o ambiente aquático carente de oxigênio.

Ademais, o aumento do nível do mar, impulsionado pelo derretimento das calotas polares em razão do aquecimento global (Ipcc 2023), tem intensificado os processos de erosão na linha de costa. Na Ilha do Marajó, a maior ilha fluviomarítima do mundo (Mendes *et al.* 2008), os manguezais foram o ecossistema mais impactado desde 1973, tendo a região próxima ao município de Soure e à Praia da Barra Velha a mais afetada, e sendo registrada uma extensão máxima de erosão de 528,02 metros, o que, entre 2006 e 2018 levou moradores da Praia da Barra Velha a migrarem para regiões mais internas da ilha (Henriques *et al.* 2024).

Além do mais, parte da emissão de CO₂ é absorvida pelos oceanos, resultando no aumento da acidez das águas que adentram aos manguezais, causando prejuízos para organismos calcificantes² como as ostras, principalmente em seu estágio larval, comprometendo o setor de ostreicultura e trazendo prejuízos econômicos (Hu & Cai 2013, Neokye *et al.* 2024).

O uso desordenado do território devido a desmatamentos implica na intensificação dos períodos de seca, fazendo com que o nível e o aporte fluvial para os sistemas estuarinos diminuam, permitindo a intrusão salina para regiões mais internas e aumentando a salinidade do solo. Este processo acaba por prejudicar os lençóis freáticos e consequentemente a disponibilização de água potável (USGS 2025), bem-estar das comunidades e agricultura, trazendo prejuízos econômicos e ambientais (Khondoker *et al.* 2023).

Em outro cenário, os efeitos das mudanças climáticas na região amazônica também refletem na grande taxa de precipitação durante os períodos chuvosos, intensificando a descarga

² Animais e plantas que utilizam carbonato de cálcio para produzir conchas e esqueleto (EPA 2024)

de água doce nos sistemas estuarinos. Este processo causa a rápida diminuição dos níveis de salinidade, sendo prejudicial para organismos aquáticos que vivem em uma faixa específica de salinidade. Este tipo de cenário pode trazer prejuízos econômicos para os ostreicultores, visto que a baixa salinidade causa estresse fisiológico e diminuem a taxa de crescimento das ostras (Neokye *et al.* 2024).

Com base nos danos causados pelas mudanças climáticas na ZCA e em outras regiões nacionais e internacionais, em 2017, a Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI), da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), proclamaram o período de 2021-2030 como a década internacional dos oceanos, cujo propósito é engajar a comunidade científica a desenvolver o conhecimento tecnológico e sustentável para os oceanos a fim de propor soluções que revertam os danos causados ao ecossistema marinho (Ryabinin *et al.* 2019). A implementação desta ideia também tem como objetivo gerar dados e informações importantes para subsidiar políticas públicas que estejam alinhadas com os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS).

Sendo assim, o acompanhamento contínuo das variabilidades meteorológicas e oceanográficas na ZCA desempenha um papel fundamental na elaboração de estratégias de proteção e mitigação, principalmente por ser uma área vulnerável aos impactos das mudanças climáticas. O monitoramento de longo prazo desses parâmetros contribuirá para a compreensão e prevenção de interferências antrópicas, para a proteção dos ecossistemas de manguezal, e para promover ações preventivas diante de fenômenos naturais intensos.

No Brasil, os principais órgãos federais que monitoram parâmetros meteorológicos são o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET³) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE⁴), sendo o INMET responsável por uma vasta rede de estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil. Até março de 2025, o INMET conta com 600 estações automáticas⁵ em seu banco de dados, mas apenas 421 estações encontram-se em funcionamento (70,16% do total). Além disso, apenas 21,14% das estações operantes (89 estações) estão localizadas na Amazônia Legal, sendo a maioria das estações concentradas nas regiões sudeste, nordeste e sul (**Figura 1**), refletindo uma baixa quantidade de dados monitorados nesta região.

³ portal.inmet.gov.br

⁴ gov.br/inpe/pt-br

⁵ Estações meteorológicas que não necessitam de um operador para recuperar os dados localmente.

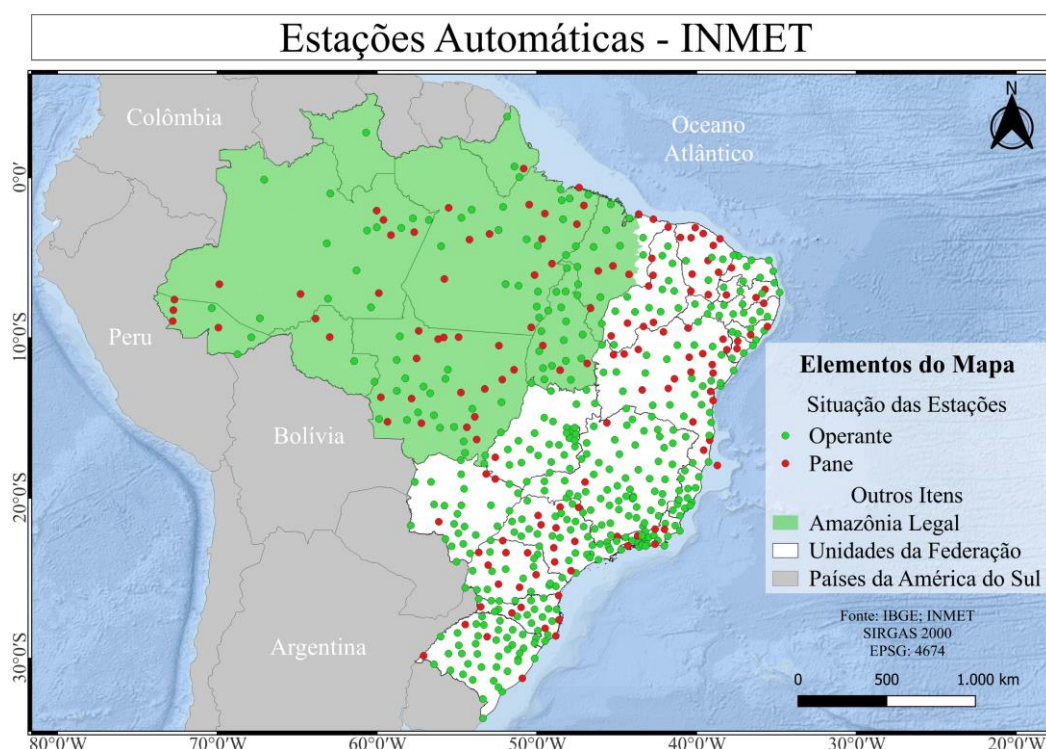


Figura 1 – Distribuição das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Fonte: Autor.

Quanto aos parâmetros oceanográficos, o principal órgão de monitoramento é a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN⁶), comandada sob a Marinha do Brasil, responsável por criar e atualizar cartas náuticas, gerenciar a sinalização náutica, realizar levantamentos hidrográficos e monitorar marés, ondas e correntes marítimas. A DHN dispõe de 220 estações maregráficas situadas ao longo da região costeira brasileira e águas interiores (**Figura 2**).

Além da DHN, existem cerca de 9 iniciativas proveniente de instituições privadas, governamentais e científicas em relação à observação e modelagem costeira (Franz *et al.* 2021). Considerando a importância ambiental, social e econômica da ZCA, foi criado, em 2009, o Observatório da Costa Amazônica (OCA⁷), com a finalidade de coletar, sistematizar e padronizar dados meteoceanográficos tanto da zona costeira quanto da plataforma continental adjacente. O OCA conta com um vasto banco de dados contendo informações sobre marés, ondas, temperatura, pH, Eh, salinidade, sólidos totais dissolvidos e oxigênio dissolvido. O objetivo principal é disponibilizar essas informações para fomentar o desenvolvimento científico multidisciplinar na região (Franz *et al.* 2021).

⁶ marinha.mil.br/dhn

⁷ oca.eco.br

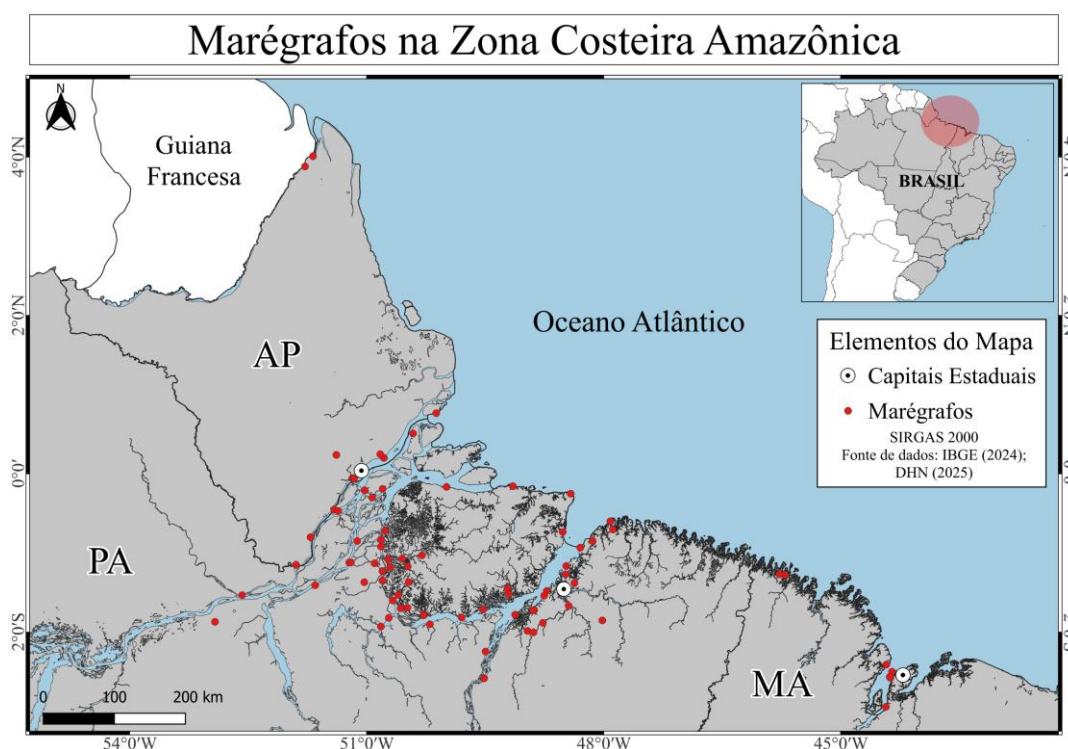


Figura 2 – Localização dos marégrafos da zona costeira amazônica administrados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Fonte: Autor.

Entretanto, apesar da vasta quantidade de pontos de monitoramento, poucos se concentram de fato na ZCA brasileira, que compreende a costa do estado do Amapá, Pará, e até a parte oriental do estado do Maranhão (Fernandes *et al.* 2018). Em relação ao INMET, das 89 estações meteorológicas operantes na Amazônia Legal, apenas 7 estações estão em pleno funcionamento no litoral amazônico (Inmet 2025a), representando apenas 7,86% do total de estações na Amazônia Legal e 1,66% em relação à todas as estações operantes no Brasil. A DHN possui cerca de 90 estações maregráficas situadas na ZCA, representando aproximadamente 1/3 do total de marégrafos, uma proporção considerável, mas que se concentra na foz dos rios Pará e Amazonas e porção ocidental da ilha do Marajó (**Figura 2**). Já o OCA possui um banco de dados com cerca de 50 estações de amostragem disponíveis de campanhas anteriores, com a maior parte concentrada na baía do Marajó (**Figura 3**).

Como as estações de monitoramento estão distribuídas de forma estratégica, porém concentradas principalmente nas proximidades da foz dos rios Pará e Amazonas, grande parte das demais áreas da ZCA permanece desprovida de monitoramento, o que contribui para a lacuna de dados existente na região, dificultando a compreensão das dinâmicas meteoceanográficas e de suas alterações decorrentes de impactos antrópicos e das mudanças climáticas. A carência de dados contínuos nessas regiões compromete o avanço da pesquisa

científica local, dificultando a construção de modelos de previsão confiáveis e a formulação de estratégias eficazes de proteção e mitigação contra possíveis eventos climáticos extremos.

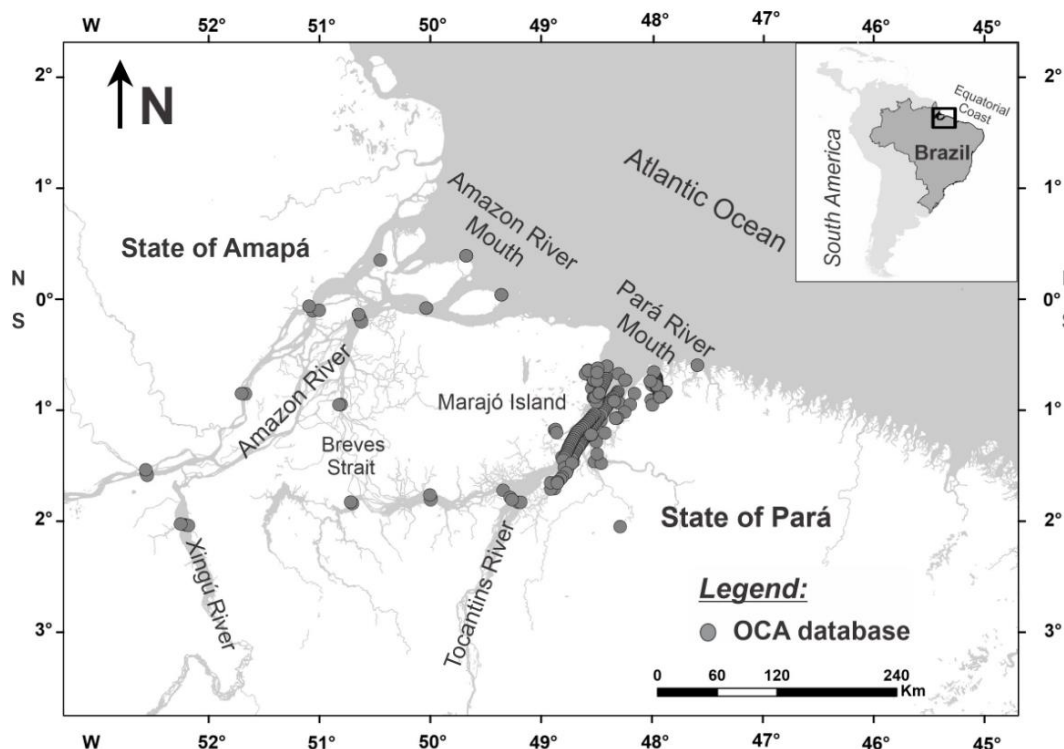


Figura 3 – Localização das estações de amostragem do Observatório da Costa Amazônica (OCA).
Fonte: (Franz *et al.* 2021).

Dessa forma, propor a ampliação da cobertura de monitoramento a fim de reduzir as lacunas de dados na ZCA requer um alto investimento para aquisição de equipamentos necessários, além da mão de obra para instalação e manutenção das novas estações de monitoramento. Uma estação meteorológica automática pode custar entre R\$ 2.830,00⁸ a R\$ 29.100,00⁹, dependendo da quantidade de parâmetros meteorológicos coletados e da qualidade dos sensores. Já uma estação para monitorar os principais parâmetros oceanográficos, como nível, temperatura e salinidade da água, podem variar entre R\$ 24.677,29¹⁰ e R\$ 25.950,00¹¹.

Nesse contexto, torna-se fundamental buscar alternativas que possibilitem superar a ausência do monitoramento contínuo em diversas áreas da ZCA. Logo, caso essa limitação esteja relacionada a barreiras econômicas, uma solução viável seria o desenvolvimento de estações de monitoramento contínuo de baixo custo, capazes de ampliar a coleta e disponibilização de dados em tempo real, e reduzir as lacunas atualmente existentes. Esta

⁸ Novotest FT0320. *Tecnoferramentas Comercial Importação e Exportação Ltda.* Valor cotado em março de 2025.

⁹ Davis Vantage Pro2. *Clima e Ambiente Comércio e Serviços Ltda.* Valor cotado em março de 2025.

¹⁰ Levelogger 5 LTC M5. *Ag Solve - Monitoramento Ambiental Ltda.* Orçamento solicitado em maio de 2023

¹¹ CTD-Diver. *Water Services and Technologies Ltda.* Orçamento solicitado em maio de 2023.

solução pode reduzir a dependência de equipamentos importados que exigem manutenção especializada e alto custo operacional. Diversos autores já trabalharam com a proposta de reduzir custos de equipamentos para monitoramento remoto (Cruz-Colon *et al.* 2012, Gillett & Marchiori 2019, Gunawardena *et al.* 2018, Rao *et al.* 2013, Wang *et al.* 2018), evidenciando a viabilidade técnica e a relevância estratégica dessa alternativa em larga escala.

Portanto, visando ampliar o monitoramento em regiões com baixa cobertura, permitir o monitoramento participativo de dados meteoceanográficos em comunidades costeiras, e contribuir com os objetivos de desenvolvimento sustentável, o presente trabalho propõe uma alternativa para a formação de uma nova malha de monitoramento que colete e envie dados em tempo real da ZCA, com o intuito de promover a geração de novos dados meteoceanográficos em áreas ainda desprovidas de monitoramento, oferecendo informações importantes para a formulação de estratégias e políticas públicas voltadas à proteção e conservação de ambientes vulneráveis às mudanças climáticas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um equipamento de baixo custo que seja capaz de coletar, de forma contínua, dados meteoceanográficos, a fim de propor uma alternativa para a redução de lacunas desses dados meteoceanográficos na zona costeira amazônica.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Criar instrumentos de baixo custo que permitam a coleta de dados meteoceanográficos em monitoramento participativo;
- Coletar dados meteorológicos: umidade relativa, temperatura, pressão atmosférica, precipitação, e intensidade e direção do vento;
- Coletar dados oceanográficos: temperatura e nível da água;
- Comparar acurácia dos sensores utilizados no equipamento desenvolvido com equipamentos de medição meteorológicos e oceanográficos disponíveis no mercado;
- Criar curva de calibração para os sensores utilizados no equipamento construído;

Descrever custos, viabilidade e potencial de uso do equipamento construído.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

A ZCA representa uma das regiões mais complexas do território brasileiro, abrigando uma diversidade de ambientes, como praias, manguezais, ilhas, deltas, dunas, florestas tropicais, planícies de marés e estuários, possuindo intensos processos climáticos, geomorfológicos e oceanográficos. Ela compreende a faixa litorânea do estado do Amapá, Pará e Maranhão (Fernandes *et al.* 2018, Muehe 2018). Esta região é definida por Souza-Filho (2005) como Costa de manguezais de macromaré da Amazônia, possuindo uma área total de aproximadamente 7500 km², recortada por vários estuários e correspondendo a uma zona altamente energética com grande descarga de sedimento, nutrientes e matéria orgânica, sendo influenciada principalmente pela maré (Muehe 2018, Muehe & Nicolodi 2008).

O padrão hidroclimático da ZCA é fortemente influenciado pela flutuação sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Marengo & Hastenrath 1993), zona esta que é formada pela convergência dos ventos alísios, que fica posicionada entre, aproximadamente, 14°N e 2°S ao longo de todo o ano, sendo responsável pela intensificação dos períodos chuvosos nas regiões norte e nordeste do Brasil durante os meses de fevereiro a maio, quando a ZCIT se desloca para o hemisfério sul, e pelos períodos secos nos meses restantes, após a ZCIT se deslocar para o hemisfério norte (Inmet 2023).

A ZCA engloba os Estados do Amapá, Pará e parte do Maranhão. A zona costeira do estado do Amapá (ZCEA) estende-se por aproximadamente 750km entre as desembocaduras dos rios Jari e Oiapoque e é dominado por extensos cordões de manguezais, possuindo clima predominantemente quente e úmido, com uma baixa variação anual de temperatura, entre 24 °C e 26°C. A umidade relativa do ar oscila entre 80% e 90%. O regime pluviométrico anual da ZCEA varia entre 2750 mm e 3500mm anuais, sendo fortemente influenciado pela ZCIT (Torres *et al.* 2018).

O rio Amazonas divide o estado do Amapá e Pará, e constitui o principal sistema fluvial, sedimentar e hidrológico da ZCA. Apresenta uma vazão média de 207.700,0 m³/s, a maior entre todos os rios que deságuam na zona costeira do Brasil, além de ser responsável por uma descarga de sedimentos suspensos de 1.154 x 10⁶ toneladas por ano (Dominguez 2009), contribuindo para a formação da pluma do rio Amazonas, uma área rica em nutrientes e materiais particulados que influencia significativamente a salinidade e turbidez da plataforma continental (Muehe 2018), além de contribuir para as variações sazonais e interanuais do nível do mar (Giffard *et al.* 2019). A maré é a principal forçante do estuário do rio Amazonas, sendo

predominante o regime macromaré¹² semidiurna¹³, com locais alcançando até 12 metros (hipermaré¹⁴), como é o caso da ilha de Maracá (Torres *et al.* 2018).

A Zona Costeira do Estado do Pará (ZCEP), por sua vez, possui aproximadamente 650 km de extensão, abrangendo desde a costa do Salgado Paraense até a foz do rio Amazonas, sendo caracterizada por uma ampla rede estuarina, abrigando uma área de manguezal de 2100 km² (El-Robrini *et al.* 2018a, Souza-Filho 2005). O clima é úmido e quente, assim como a ZCEA, possuindo uma pequena variação térmica anual de 24 °C e 27 °C, e umidade relativa do ar elevada, variando entre 84% e 93%. A precipitação média anual é de 2500 mm, com uma estação chuvosa entre dezembro e junho e seca nos meses restantes. A ZCEP está sujeita a um regime de mesomaré¹⁵ e macromaré, sendo este um dos principais forçantes responsáveis por processos geomorfológicos da região, junto com ondas, ventos e descarga fluvial, como erosão e acumulação (El-Robrini *et al.* 2018a).

Por fim, a Zona Costeira do Estado do Maranhão (ZCEM) estende-se por aproximadamente 640 km entre a foz dos rios Gurupi e Parnaíba, sendo caracterizada por um litoral altamente recortado, dominado por estuários, baías e um extenso cinturão de manguezais associados a um regime de macromaré. O clima da região é semelhante à ZCEA e ZCEP, com temperaturas elevadas durante o ano todo, em torno de 26 °C, e com amplitudes máximas de 35,3 °C entre outubro e novembro. Apresenta uma estação chuvosa bem definida entre janeiro e maio e um período seco entre os meses restantes. A precipitação anual possui média de 1823 mm, sob influência direta da ZCIT (El-Robrini *et al.* 2018b). A região apresenta um dos maiores regimes de maré do Brasil, com marés semidiurnas (Beardsley *et al.* 1995) e amplitudes superiores a 7m (hipermarés) registradas no rio Turiaçu e baía de São Marcos (Rebello-Mochel & Ponzoni 2007, Souza-Filho 2005). Os sedimentos transportados pelos rios, combinados às correntes de maré e ventos, promovem intensa sedimentação, facilitando a expansão dos manguezais, que totalizam mais de 5.400 km² na costa maranhense, sendo o estado com maior área de manguezal da ZCA (Souza-Filho 2005), tornando-a uma das regiões de maior importância ecológica do país.

Do ponto de vista econômico, a ZCA abriga uma diversidade de atividades produtivas ligadas ao extrativismo, como a pesca artesanal, coleta de mariscos e o cultivo de ostras e

¹² Regime de maré com variação entre 4 e 6 metros.

¹³ Duas marés altas e duas marés baixas por dia lunar.

¹⁴ Regime de maré com altura acima de 6 metros.

¹⁵ Regime de maré com variação entre 2 e 4 metros.

camarões (Fernandes *et al.* 2018, Neokye *et al.* 2024). Tais práticas garantem a segurança alimentar e a subsistência de milhares de famílias, muitas delas organizadas em reservas extrativistas (RESEX), como a de Soure, no Marajó, cuja principal fonte de alimentação e renda é a pesca artesanal, extrativismo vegetal, coleta de moluscos e extração de caranguejos (Oliveira 2012). No entanto, essas atividades estão sendo constantemente ameaçadas pelas mudanças climáticas.

A preservação dos ecossistemas presentes na ZCA é de extrema importância tendo em vista seu potencial ecológico e ambiental (Boulhosa & Souza-Filho 2009). O aumento do nível do mar, causado pelo aquecimento global, tem provocado erosão e perda dos ecossistemas costeiros em larga escala (Ipcc 2023), colocando em risco não apenas os ecossistemas presentes na ZCA, mas também os modos de vida tradicionais das comunidades costeiras. Henriques *et al.* (2024) simulou cenários de inundação da Ilha do Marajó até o ano de 2100, cujo trabalho indicou que, em cenários nos quais o nível do mar sobe até 2 metros, extensas áreas de várzea e regiões costeiras urbanizadas estariam sob risco de alagamento permanente, afetando diretamente populações ribeirinhas e acarretando a diminuição da biodiversidade local. Além disso, a intrusão salina nos estuários, causado pelo aumento do nível do mar e diminuição do aporte de água doce nos sistemas estuarinos durante os períodos de seca, compromete diretamente a integridade dos manguezais e ameaça à segurança alimentar das populações que dependem dos recursos extraídos deste ambiente (Fernandes *et al.* 2018, Henriques *et al.* 2024, Owuor *et al.* 2024).

3.2 MONITORAMENTO METEOCEANOGRÁFICO DE BAIXO CUSTO

A utilização de equipamentos de monitoramento desempenha um papel fundamental em diversos setores, como saúde, transporte, engenharia, agricultura, recursos hídricos e monitoramento climático, sendo essenciais para o fornecimento de informações precisas que possam contribuir para gestões eficientes e tomadas de decisões. Tais equipamentos também fazem parte do nosso dia a dia, estando presente em diversos dispositivos como relógios, eletrodomésticos, veículos e sistemas de controle de temperatura em residências.

Na área ambiental, principalmente na climatologia, o principal instrumento para monitorar os parâmetros atmosféricos são as estações meteorológicas. As estações meteorológicas reúnem diversos instrumentos para medir parâmetros meteorológicos, sendo os mais comuns: termômetro (temperatura do ar), barômetro (pressão atmosférica), higrômetro (umidade relativa do ar), anemômetro (intensidade e direção do vento), piranômetro (radiação solar) e pluviômetro (precipitação) (Inmet 2025b).

As estações meteorológicas podem ser do tipo convencional, isto é, os parâmetros registrados pelos sensores presentes na estação devem ser lidos e anotados por um observador em intervalos definidos e depois enviados para um centro de processamento dos dados, ou automáticas, sendo essas compostas por um *datalogger*¹⁶ que armazena continuamente os dados captados pelos sensores em um intervalo específico e os envia via satélite ou conexão com a internet para o banco de dados. As estações automáticas do INMET captam dados a cada hora e as convencionais três vezes ao dia (Inmet 2025b).

Além dos equipamentos climatológicos, diversos são os equipamentos utilizados para o monitoramento de parâmetros oceanográficos. O instrumento mais utilizado é o CTD¹⁷, utilizado para realizar perfis verticais da coluna d'água, coletando dados de temperatura, profundidade e salinidade. Modelos mais sofisticados de CTDs possuem sensores capazes de coletar dados biogeoquímicos, como oxigênio dissolvido, pH e clorofila. Outro equipamento fundamental é o marégrafo, especialmente em áreas portuárias, onde é essencial para registrar a variação do nível do mar. Esses dados permitem a previsão da maré e, quando usados em conjunto com dados de cartas náuticas¹⁸, contribuem para a logística portuária (Calazans 2011).

Nos últimos anos, tem-se observado crescente interesse no desenvolvimento e uso de equipamentos de baixo custo para monitoramento de parâmetros ambientais, principalmente em países em desenvolvimento como Índia e Bangladesh (Camargo *et al.* 2023). Esta alternativa também é de interesse do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, no qual visa implantar redes de monitoramento de qualidade do ar acessíveis em países em desenvolvimento, com o intuito de suprir lacunas de dados de qualidade do ar (UNEP 2020). O uso desta tecnologia é uma alternativa para ampliar o monitoramento em regiões remotas ou com restrições orçamentárias visto que equipamentos de alta qualidade são relativamente custosos de se adquirir.

Os equipamentos de baixo custo são construídos com base em sistemas embarcados, isto é, sistemas microcontrolados que exercem uma tarefa específica após serem programados, sendo amplamente utilizados em eletrodomésticos, aparelhos de comunicação, periféricos de computadores, sistemas de armamentos militares e brinquedos (Almeida *et al.* 2016, Tanenbaum & Todd 2013). A maioria dos estudos voltados para o monitoramento de baixo custo

¹⁶ Dispositivo eletrônico que registra informações de sensores ou instrumentos e armazena os dados coletados automaticamente ao longo do tempo.

¹⁷ Sigla em inglês para Conductivity, Temperature and Depth (Calazans 2011).

¹⁸ Documentos cartográficos que fornecem informações sobre profundidade, perigos à navegação, natureza de fundo, fundeadouros e elementos de marés e correntes (CHM 2025).

envolvem a utilização de plataformas de prototipagem eletrônica, sendo o Arduino, ESP32, ESP8266 os mais utilizados (Camargo *et al.* 2023).

Estes dispositivos possuem processadores para executar as tarefas programadas, memória para armazenar algoritmos e variáveis, e terminais de entrada e saída para comunicação com sensores ou outros microcontroladores. Alguns modelos de placa de prototipagem possuem comunicação bluetooth e WiFi embutidas como é o caso do ESP32 (Espressif System 2025), sendo importantes em projetos de IoT¹⁹ (*Internet of Things*). Os sistemas embarcados podem integralizar vários tipos de sensores, módulos de comunicação, armazenamento de dados e atuadores, como é apresentado na **Figura 4**.

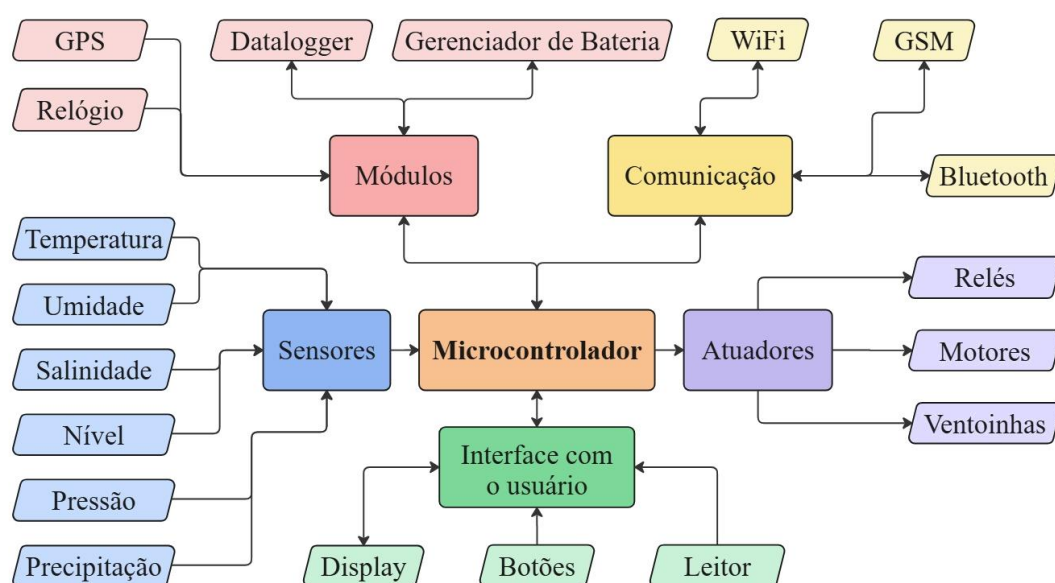


Figura 4 – Exemplo esquemático de um sistema embarcado. Fonte: Autor.

Diversos autores já trabalharam com a proposta de baratear equipamentos para monitoramento remoto. Rao *et al.* (2013) elaborou um sistema de monitoramento contínuo utilizando sensores de baixo custo para gerenciar a qualidade da água, incluindo uma série de parâmetros físico-químicos: temperatura, salinidade, intensidade luminosa, pH, Eh, sólidos totais dissolvidos e oxigênio dissolvido. Seu trabalho foi capaz de fornecer dados confiáveis e contínuos de longo prazo, a um custo muito inferior comparado às tecnologias existentes, sendo possível utilizar por gerenciadores de bacias hidrográficas quanto a vigilâncias da qualidade da água.

Parmar *et al.* (2017) construiu um sistema de monitoramento da poluição do ar utilizando dois sensores de baixo custo para monitorar concentrações de monóxido de carbono (CO),

¹⁹ Conceito referente à conexão de objetos físicos à internet (Singh *et al.* 2014)

dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e amônia (NH_3). Os sensores utilizados oferecem vantagens como baixo custo e manutenção, resposta rápida e medições contínuas.

Estações de monitoramento de baixo custo também estão sendo desenvolvidas para o uso no campo, sendo de grande ajuda para agricultores. Math & Dharwadkar (2018) desenvolveram uma estação meteorológica de baixo custo para medir temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa e radiação solar. Seu sistema é capaz de fornecer aos agricultores a situação atmosférica em tempo real e disponibilizar os dados via internet. Além do mais, estações meteorológicas de baixo custo também estão sendo empregados em estudos em glaciares para monitorar os impactos das mudanças climáticas neste tipo de ambiente (Tomaschewski Netto & Arigony-Neto 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROTÓTIPO

O protótipo de monitoramento contínuo (PMC) foi construído utilizando um microcontrolador ESP32 (**Figura 5**), desenvolvido pela Espressif Systems, sendo amplamente utilizado em projetos de IoT. Sua escolha foi motivada pelas suas características, como: conexão WiFi (sendo necessário para o envio de informações para o banco de dados em nuvem), tensão de operação de 3,3V - 5V, 2,4 GHz e Bluetooth 4,2 integrados, processador de dois núcleos com frequência de até 240 MHz, memória flash externa de 16MB, 34 portas lógicas de entrada e saída, sendo 4 portas para interface SPI, duas para I²C e três para comunicação UART, e resolução de 12 bits (Espressif System, 2025). O ESP32 é mundialmente utilizado para várias aplicações, incluindo equipamento para casas inteligentes, automação industrial e hospitalar, agricultura e estações de monitoramento.

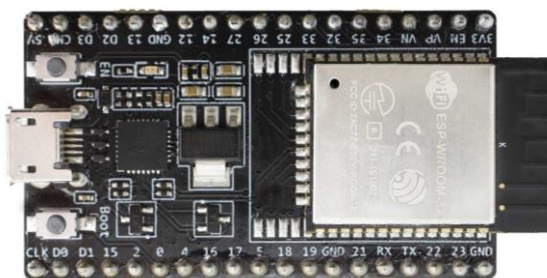


Figura 5 – Placa de desenvolvimento ESP32 DevKit. Fonte: (Eletrogate 2018).

4.1.1 Sensores

O PMC conta com diversos sensores para medir tanto parâmetros meteorológicos quanto oceanográficos. Para medir temperatura e umidade relativa do ar, foi utilizado os sensores HDC1080 e AM2302 (**Figura 6**), sendo que ambos coletam os dois parâmetros ao mesmo tempo, a fim de analisar o sensor com melhor desempenho a ser utilizado no PMC. O HDC1080 (**Figura 6a**) é um sensor digital, desenvolvido pela Texas Instruments, que se destaca por sua alta precisão e baixo consumo de energia. Operando com tensão de 2,7 V a 5,5 V e interface de comunicação I²C, ele oferece acurácia de umidade de $\pm 2\%$ RH e temperatura $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, com resoluções configuráveis de até 14 bits. Seu consumo típico é de $1,3\text{ }\mu\text{A}$ para medições combinadas a 1 Hz, o que o torna ideal para aplicações com restrições energéticas, como dispositivos portáteis, dispositivos médicos, soluções de IoT e sistemas de controle de aquecimento, ventilação e ar-condicionado em ambientes internos. Além disso, o sensor é calibrado de fábrica, oferecendo uma solução eficiente para monitoramento ambiental em tempo real (Texas Instruments 2016).

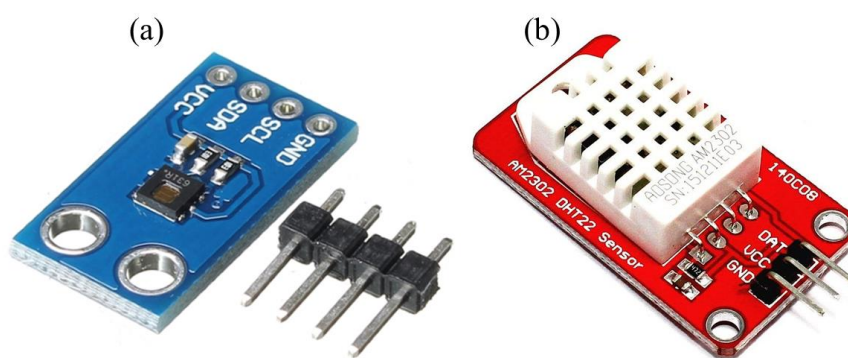


Figura 6 – Sensores de temperatura e umidade relativa (a) HDC1080 e (b) AM2302. Fonte: Adaptado de Teixeira (2019) e Arduino e Cia (2018).

O sensor AM2302 (**Figura 6b**), fabricado pela Aosong Electronics, é um dispositivo que combina um sensor capacitivo de umidade e um termistor²⁰ de precisão. Suas principais características incluem uma faixa de medição de umidade de 0 a 100% com acurácia de $\pm 2\%$, e temperatura de -40 a $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ com acurácia de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ambas com resolução de 0,1. Funciona com tensões de 3,3V a 5,5V, possui baixo consumo de corrente e tempo de resposta típico de 2 segundos. O encapsulamento do sensor inclui proteção contra poeira, o que aumenta sua durabilidade e estabilidade, mesmo em ambientes adversos. É amplamente utilizado em aplicações como automação residencial, estações meteorológicas, controle de climatização e monitoramento de estufas (Aosong 2015).

Para medir a pressão atmosférica, foi utilizado dois sensores barométricos com o mesmo intuito de averiguar qual sensor é o mais apropriado para incorporar ao PMC. Para isso, foi utilizado o sensor MS5611 e BMP280. O sensor MS5611 (**Figura 7a**) é um módulo barométrico de alta resolução, desenvolvido pela Measurement Specialties. Este sensor combina um transdutor piezoresistivo de pressão com um conversor analógico-digital (ADC) de 24 bits, fornecendo medições precisas de pressão e temperatura, com resolução de até 0,012 hPa e 0,01 $^{\circ}\text{C}$, e acurácia de $\pm 1,5$ hPa (25 $^{\circ}\text{C}$, 750 hPa) para pressão e $\pm 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura. É amplamente utilizado para aplicações que exigem alta sensibilidade, como altímetros, sistemas de navegação indoor e sensores médicos. O MS5611 opera em uma faixa de pressão de 10 hPa a 1200 hPa, temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, com baixo consumo de energia ($< 0,15\text{ }\mu\text{A}$) e resposta rápida (0,5 ms). A comunicação com microcontroladores pode ser feita via interfaces SPI ou I²C, dispensando a necessidade de componentes externos, o que facilita o

²⁰ Componente eletrônico cuja resistência elétrica é afetada pela mudança de temperatura.

desenvolvimento de sistemas embarcados de medição ambiental (Measurement Specialties 2017).

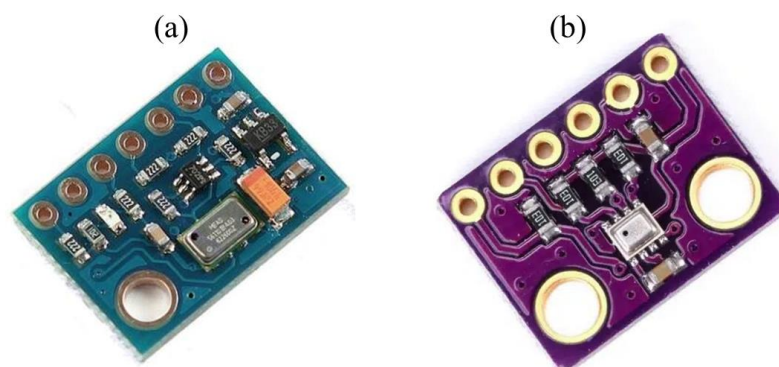


Figura 7 – Sensores de pressão barométrica (a) MS5611 e (b) BMP280. Fonte: Adaptado de Alam (2023) e Guse (2024).

O BMP280 (**Figura 7b**) é um sensor digital de pressão barométrica com alta precisão e baixo consumo de energia. Desenvolvido pela Bosch Sensortec, este sensor é capaz de operar em uma faixa de pressão de 300 hPa a 1100 hPa e temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sua acurácia é de $\pm 0,12\text{ hPa}$ (equivalente a ± 1 metro de variação de altitude), com resolução de até $0,0016\text{ hPa}$ em modo de ultra alta resolução. O sensor também realiza medições de temperatura com resolução de $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ e acurácia de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. A comunicação digital é feita via interfaces I²C ou SPI, oferecendo flexibilidade para diferentes plataformas. Com consumo de $2,7\text{ }\mu\text{A}$ a 1 Hz , o BMP280 é ideal para aplicações como navegação indoor, monitoramento climático, drones, smartphones, relógios e estações meteorológicas domésticas (Bosch Sensortec 2021b).

Para medir a temperatura da água, foi utilizado o sensor DS18B20 (**Figura 8**), um termômetro digital de alta precisão com resolução programável de 9 a 12 bits, desenvolvido pela Maxim Integrated. Opera com tensão de alimentação entre $3,0\text{ V}$ e $5,5\text{ V}$ e mede temperaturas na faixa de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, com acurácia de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, e resolução mínima de $0,0625^{\circ}\text{C}$, levando um tempo de conversão da leitura de 750 milissegundos na maior resolução (12 bits). Cada sensor possui um código serial único de 64 bits, permitindo o uso de vários dispositivos no mesmo barramento sem causar conflitos. O DS18B20 é amplamente utilizado em projetos de automação residencial, instrumentação científica, sistemas de monitoramento remoto e dispositivos embarcados (Maxim Integrated 2019).



Figura 8 – Sensor de temperatura DS18B20. Fonte: (Thomsen 2015).

Para medir a variação de nível da maré, foi utilizado um sensor ultrassônico modelo HC-SR04 (**Figura 9**). Trata-se de um sensor genérico produzido por diversas empresas e amplamente utilizado em projetos de automação e robótica. Sua simplicidade de uso e baixo custo fez com que fosse optado para ser usado no PMC. O HC-SR04 utiliza uma frequência de operação de 40 kHz e possui um ângulo de feixe de 15 graus, sendo capaz de medir distâncias de 2 cm a 400 cm com uma acurácia de aproximadamente 3mm. Sua tensão de operação é de 5V e consumo de 15 mA (Sparkfun 2025).



Figura 9 – Sensor ultrassônico HC-SR04. Fonte: Adaptado de Alam (2025).

Além dos sensores citados anteriormente, outros sensores utilizados foram desenvolvidos em laboratório para medir parâmetros de precipitação e intensidade e direção do vento. O sensor de precipitação, assim como o anemômetro, foi projetado utilizando software Autodesk Fusion 360 e, posteriormente, impressos em uma impressora 3D modelo Creality K1C. O pluviômetro desenvolvido (**Figura 10a**) é do tipo basculante, com uma resolução de 0,14 mm a cada pulso. O movimento da balsa é detectado por um sensor magnético acoplado a ela, que emite um pulso sempre que ocorre uma movimentação. Tanto a balsa como o corpo do pluviômetro foram impressos utilizando filamento ASA (acrilonitrila estireno acrilato), sendo este filamento ideal para impressões de peças que serão expostas a condições externas de chuva e radiação ultravioleta (Botero-Valencia *et al.* 2022).

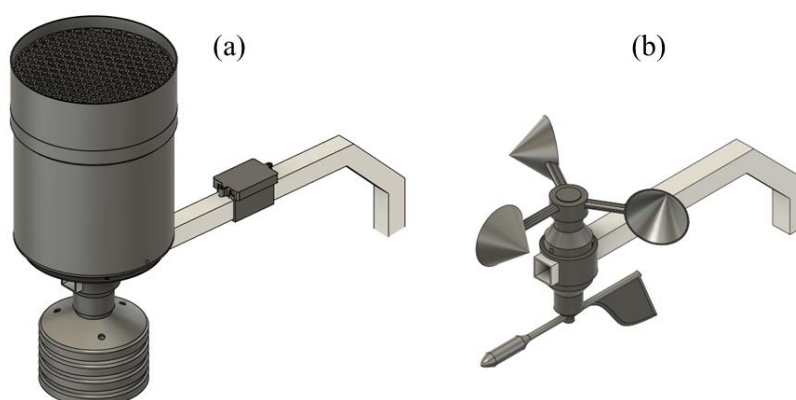


Figura 10 – Esquemático 3D de: (a) pluviômetro com abrigo meteorológico na parte inferior; e (b) anemômetro (parte superior) e veleiro (parte inferior). Fonte: Autor.

O anemômetro e o veleiro (**Figura 10b**), utilizados para verificar a intensidade e direção do vento, também foram impressos em ASA. Seu funcionamento se baseia no uso do módulo AS5600 (**Figura 11**), um sensor de ângulo com efeito Hall de 12 bits, que proporciona uma resolução de 0,088 graus. A medição é realizada com o auxílio de um ímã diametralmente magnetizado colocado em seu eixo central, cuja orientação do campo magnético determina o ângulo medido, podendo ser de 0 a 360 graus. Sua comunicação pode ser feita via interface I²C, possui tensão de operação de 3,0V a 5,5V e baixo consumo de energia (1,5 mA) (AMS Osram 2018).

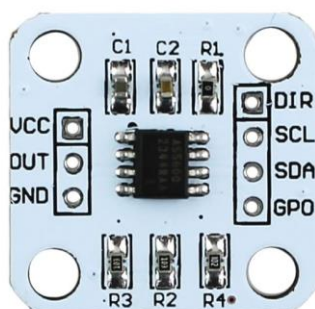


Figura 11 – Sensor rotativo de efeito hall AS5600. Fonte: Adaptado de Usinainfo (2025).

Para o veleiro, o ímã é instalado em uma haste acoplada ao leme de direção, posicionando-se a aproximadamente ± 2 mm do AS5600. Esse sensor detecta apenas o polo norte do ímã, tornando necessário a calibração do norte do sensor com o norte verdadeiro. Esse processo é realizado por meio de um sistema integrado ao PMC, que, ao apontar o veleiro para o norte verdadeiro, define esse ponto como sua referência (ângulo zero). Essa calibração do norte verdadeiro elimina uma limitação comum das estações meteorológicas, que normalmente exigem alinhamento com um ponto cardinal específico indicado em seus manuais.

O anemômetro do PMC é do tipo copo, e sua rotação é determinada a partir da velocidade angular do ímã acoplado ao mecanismo. Para medir essa velocidade, o controlador (ESP32) registra o ângulo em radianos no instante t_0 e, após 10 milissegundos, realiza uma nova leitura no instante t_1 . A diferença entre esses ângulos é utilizada para calcular a velocidade angular média, dada por $\omega = \Delta\theta/\Delta t$. Por fim, considerando o raio do anemômetro, o controlador calcula a velocidade linear do vento.

4.1.2 Sistema de alimentação e gerenciamento de energia

O suprimento de energia do PMC é garantido por uma bateria de chumbo-ácido de 12V e 7Ah junto com um painel solar com potência de 10W, ambos conectados a uma controladora de carga independente do sistema principal. A controladora possui um mecanismo de segurança que não permite que a bateria descarregue abaixo de 10V, cortando totalmente o fornecimento de energia para o PMC, mantendo a integridade da bateria. Quanto ao seu fornecimento de energia, a controladora fornece 5V para o ESP32 via porta USB que por sua vez alimenta os sensores e componentes eletrônicos com 3,3V e 5V, respectivamente.

4.1.3 Sistema de armazenamento de dados

Os dados são armazenados localmente via cartão micro SD e em nuvem, utilizando o serviço *Realtime Database*, integrante da plataforma Firebase, mantida pelo Google. Os intervalos de medições dos parâmetros podem ser configurados de acordo com a escolha do usuário, podendo ser 1, 5, 15, 30 ou 60 minutos. O mesmo processo é feito para configurar o intervalo de envio dos dados para o banco de dados em nuvem, com exceção do intervalo de 1 minuto. Porém, o intervalo de coleta não pode ser maior que o intervalo de upload dos dados.

O sistema cria dois arquivos texto simples (TXT), um para armazenar os dados a cada coleta e outro arquivo temporário para enviar os dados para a nuvem, sendo o arquivo temporário apagado após cada interação com o banco de dados online. Este processo otimiza o funcionamento do equipamento, e contorna erros referentes à conexão do PMC com a internet ou eventuais interrupções no fornecimento de energia para o sistema. Caso o PMC não consiga se conectar ao modem WiFi, o arquivo temporário não será apagado e continuará gravando dados até que consiga se conectar novamente ao WiFi e enviar os dados para a nuvem.

Em relação à conectividade via internet WiFi, o PMC consta com uma entrada USB onde é inserido um modem 4G. A alimentação da porta USB é controlada pelo sistema para mantê-la desligada devido ao seu alto consumo de energia, ligando-a 1 minuto antes de enviar os dados via nuvem. Porém, caso o equipamento esteja configurado para transmitir os dados a cada

minuto, então o WiFi permanece ligado de forma contínua. Diante disso, se faz necessário utilizar um conjunto de bateria e painel solar de maior capacidade para suprir a demanda de energia do sistema.

4.1.4 Montagem, programação e custos de produção

O PMC foi montado utilizando uma placa de circuito impresso (PCI) perfurada para acomodar os componentes eletrônicos. Além do ESP32 e dos sensores, o equipamento consta com um módulo *real time clock* (RTC) para registrar data e hora de cada coleta, e um módulo leitor de cartão Micro SD, que realiza a interface entre o cartão de memória e o ESP32. Apenas os sensores de pressão barométrica estão inseridos na PCI, tendo os outros sensores de temperatura e umidade acoplados no abrigo meteorológico localizado abaixo do pluviômetro (**Figura 10a**). Todos os sistemas do equipamento (controlador, gerenciamento de bateria e conectividade WiFi) ficam inseridos em uma caixa hermética com dimensões de 25 cm x 20 cm x 13 cm (comprimento x largura x altura) e certificação IP66²¹ (**Figura 12**).



Figura 12 – Protótipo de monitoramento contínuo (PMC). Fonte: Autor.

A programação do ESP32 foi feita em C/C++ e foi utilizado o “Visual Studio IDE” junto com a extensão “PlatformIO” para desenvolvimento de sistemas embarcados. Esta extensão suporta múltiplas plataformas de hardwares e frameworks, no qual facilita a programação de

²¹ Certificação internacional que indica que o produto é à prova de poeira e resistente a jatos de água forte.

microcontroladores devido aos seus recursos de gerenciamento de bibliotecas, sendo essenciais para a elaboração, organização e manutenção do código à medida que a complexidade do projeto foi avançando.

Os custos dos materiais referentes à construção do PMC estão inseridos na **Tabela 1**. Foi gasto um total de R\$ 952,75 para produzir o primeiro protótipo, todavia, por questões logísticas e de prazos, os materiais foram adquiridos no Brasil, resultando em um valor mais elevado dos custos comparados com os valores dos componentes caso fossem comprados diretamente com fornecedores estrangeiros.

Tabela 1 – Tabela de custos de produção do equipamento. Custos de mão de obra não estão inseridos. Valores cotados em março de 2025 e não incluem frete e impostos.

Item	Valor Brasil (R\$)	Valor China (R\$)
AS5600	23,94	10,69
Bateria 12V 7Ah	129,0	98,0
BMP280	6,5	6,13
Caixa Hermética	109,0	109,0
AM2302	55,58	12,48
DS18B20	11,88	11,21
ESP32	59,28	14,49
Ferragens	100,0	100,0
Filamento ASA 1kg	128,8	128,8
Gerenciador de carga	48,85	25,25
HC-SR04	10,27	8,26
HDC1080	38,13	35,76
MS5611	23,1	23,31
Painel Solar 10W	127,0	127,0
Placa circuito impresso	54,25	54,25
reed switch	6,2	1,59
RTC	12,29	9,76
SD Module	8,68	6,09
Total	952,75	782,07

Fonte: Autor.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.2.1 Validação e calibração dos sensores

Os sensores possuem acurácias especificadas pelos fabricantes e documentadas em seus manuais. No entanto, é fundamental realizar a calibração para validar os dados coletados. Diante disso, como não foi possível utilizar equipamentos próprios para simular ambientes controlados e testar a precisão e a acurácia dos sensores utilizados, adotou-se uma abordagem alternativa. Com base na metodologia de amostragem de Gunawardena *et al.* (2018) e na análise de dados de Thomson & Emery (2014), foram utilizados dispositivos amplamente empregados no monitoramento ambiental para coletar os mesmos dados dos sensores PMC. O objetivo foi comparar os dados, avaliar a acurácia e a precisão, identificar possíveis discrepâncias na coleta e estabelecer uma equação de calibração por meio de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados (Thomson & Emery 2014), cuja validação do modelo foi feita por meio da análise da correlação de Pearson, coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), percentual da raiz do erro quadrático médio (%RMSE), e análise residual.

O coeficiente de correlação, apresentado na Eq. (1), é uma medida utilizada para avaliar o quão bem duas ou mais variáveis covariam no tempo ou espaço (Thomson & Emery 2014). Trata-se de um valor adimensional que varia de -1 a +1, sendo $r = -1$ indicando correlação inversa perfeita, $r = 0$ ausência de correlação, e $r = +1$ uma correlação direta perfeita (Tabela 2). Uma vez confirmada a existência de correlação em uma amostra ou população, é possível analisar o grau dessa correlação entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \times \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Tabela 2 – Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis.

$ r $	Grau de correlação
0	Nula
$0 < r < 0.3$	Fraca
$0.3 \leq r < 0.6$	Regular
$0.6 \leq r < 0.9$	Forte
$0.9 \leq r < 1$	Muito forte
1	Plena ou perfeita

Fonte: Adaptado de Jacques & Sidia (2003).

O RMSE (Eq. 2) é uma métrica utilizada para quantificar a diferença entre os valores previstos (X) por um modelo, no caso de regressão linear, e os valores observados (Y),

permitindo avaliar o grau de erro das previsões realizadas pelo modelo (Géron 2019). Quanto menor for o valor do RMSE, melhor será o desempenho do modelo, indicando que suas estimativas estão mais próximas dos dados reais. Valores mais altos, por outro lado, sugerem menor precisão e pior ajuste. O %RMSE expressa o erro do modelo em termos relativos (Eq. 3), sendo obtido pela divisão do RMSE pela média dos valores observados e multiplicando o resultado por 100. Com essa abordagem, o erro passa a ser representado como uma porcentagem em relação ao valor médio dos dados reais.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^M \frac{(X_i - Y_i)^2}{M}} \quad (2)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (3)$$

Além do RMSE e do %RMSE, a análise dos resíduos permite visualizar o comportamento dos erros cometidos pelo modelo. Quando apresentada em forma de histograma, essa análise revela a frequência e a magnitude dos desvios, ou seja, das diferenças absolutas entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo. Um histograma com a maior parte dos resíduos concentrados em torno de zero indica que o modelo realiza previsões consistentes e bem ajustadas. Em contrapartida, uma distribuição mais dispersa ou com caudas alongadas pode sinalizar que o modelo não está adequadamente ajustado ou que há a presença de outliers²² influenciando os resultados (Gunawardena *et al.* 2018).

Para criar os modelos de calibração dos sensores utilizados no PMC, foram utilizados um registrador de nível da água, temperatura e condutividade elétrica, modelo Levellogger 5 LTC M100 (CTDlog) (**Figura 13**), da marca Solinst, e uma estação meteorológica modelo CICLUS PRO (EMC) (**Figura 14**).



Figura 13 – Registrador de condutividade, temperatura e nível da água Sonlist Levellogger 5 LTC.
Fonte: (AgSolve 2025).

²² Dados fora da normalidade, podendo enviesar a análise estatística dos dados (Bento & Santos 2018).



Figura 14 – Estação meteorológica CICLUS PRO utilizada como dados de referência. Fonte: Autor.

4.2.2 Experimentos em campo

O PMC passou por um total de 4 testes para observar o comportamento dos sensores. Como apresentado na **Tabela 3**, o sensor coletou um total de 56221 dados durante todas as fases de teste, resultando no tempo total de funcionamento de 22 dias, 18 horas e 30 minutos. Primeiro, o sensor de nível, HC-SR04, foi testado no trapiche de embarque e desembarque da orla da Universidade Federal do Pará – UFPA (**Figura 15**), com uma taxa de amostragem de 1Hz em conjunto com o CTDlog, para observar o comportamento dos dois sensores em relação à variação da maré.

Tabela 3 – Quantidade de dados coletados durante cada teste.

Local	Objetivo	Taxa de medição	Quantidade de dados
Orla UFPA	Testar sensor HC-SR04	1 Hz	23842
Área arborizada adjacente à UFPA	Testar sensores meteorológicos	1/60 Hz	4436
Instituto de Geociências - UFPA	Testar gerenciamento de carga e conexão com banco de dados	1/60 Hz	12211
ICMBio – Soure	Instalação Final	1/60 Hz	15732
Total			56221

Fonte: Autor.



Figura 15 – Teste do sensor de nível HC-SR04 no trapiche da Universidade Federal do Pará. Fonte: Autor.

Um segundo teste foi feito em uma área residencial arborizada (**Figura 16**) com o intuito de verificar o comportamento dos sensores de temperatura e umidade (HDC1080 e AM2302) e pressão barométrica (BMP280) em comparação com os dados da EMC utilizada como referência. Os dados foram coletados a cada minuto. Devido ao período chuvoso em que o teste foi realizado (abril de 2024), foi esperado obter dados de umidade relativa acima de 70%, se tornando um parâmetro chave para determinar a validade do sensor HDC1080 e AM2302 em ambiente externo.



Figura 16 – Teste do protótipo de monitoramento contínuo (PMC) em área arborizada. PMC à esquerda e Estação de referência (EMC) à direita. Fonte: Autor.

Um terceiro teste foi realizado durante o mês de agosto de 2024, próximo à estação meteorológica do Instituto de Geociências da UFPA (**Figura 17**). Além de monitorar o comportamento dos sensores em uma área mais aberta, o intuito do teste foi para verificar o comportamento do sistema de gerenciamento de bateria do PMC e o funcionamento do sistema de envio de dados para o banco de dados online.



Figura 17 – Estação meteorológica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Fonte: (Ufpa 2017).

4.2.3 Local de instalação final

Devido à crescente preocupação frente às mudanças climáticas na ZCA, a missão do PMC é ser o predecessor de um novo sistema de monitoramento contínuo de baixo custo e de visualização em tempo real da costa amazônica. Seu local de instalação deve ser baseado em um local vulnerável às mudanças climáticas e que a população local necessite dos recursos naturais da região para sua economia e que não possua o monitoramento adequado.

O local escolhido para a implementação do PMC foi a Reserva Extrativista Marinha de Soure (Resexmar Soure), localizada na ilha do Marajó, uma região com um litoral dominado por manguezais que abriga diversas espécies de fauna e flora importantes para as atividades extrativistas, sendo a pesca de peixes, camarões, caranguejos e siris a principal fonte de renda das comunidades locais (Oliveira 2012).

Em 27 de setembro de 2024, a Resexmar Soure se tornou a primeira área protegida do Brasil a ser reconhecida na Lista Verde da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), um sistema de certificação para áreas protegidas e conservadas que são reconhecidas por serem geridas de forma eficaz e governadas de forma justa (ICMBio 2024), aumentando ainda mais a sua importância ambiental. Porém, a Resexmar Soure está constantemente sob ameaça das mudanças climáticas, pois está mais exposta e vulnerável a variações de nível do mar, temperatura, salinidade e padrões climáticos, afetando diretamente a população local que utiliza seus recursos naturais. Logo, se faz necessário implementar um sistema de monitoramento contínuo das variações comportamentais dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos da região para posteriormente traçar estratégias de recuperação e mitigação das áreas afetadas pelas mudanças climáticas, bem como orientar as comunidades em como se preparar para o futuro.

Sendo assim, o ICMBio-Soure, localizado à margem do rio Paracauari, disponibilizou o antigo trapiche localizado à frente da base (**Figura 18**) para que pudesse ser instalado os equipamentos para o teste final. No dia 20 de novembro de 2024, o PMC foi instalado próximo à EMC (**Figura 19**) a uma distância mínima que não obstruísse a circulação de vento, enquanto o sensor ultrassônico de nível foi instalado abaixo da plataforma (**Figura 20**). O sensor de temperatura da água foi instalado abaixo do nível da maré baixa, junto com o CTDlog. O PMC foi configurado para coletar e enviar dados para o banco de dados via internet a cada minuto, fazendo com que a estação funcionasse de modo forçado, justamente para verificar seu comportamento em situações extremas e que necessitem de alta frequência de dados. A EMC e

o CTDlog foram configurados para coletar um dado a cada dez minutos, visando preservar a bateria.



Figura 18 – Local de instalação do protótipo de monitoramento contínuo (PMC). Fonte: Autor.



Figura 19 – Estação meteorológica de referência (EMC) à esquerda e o protótipo de monitoramento contínuo (PMC) à direita. Fonte: Autor.

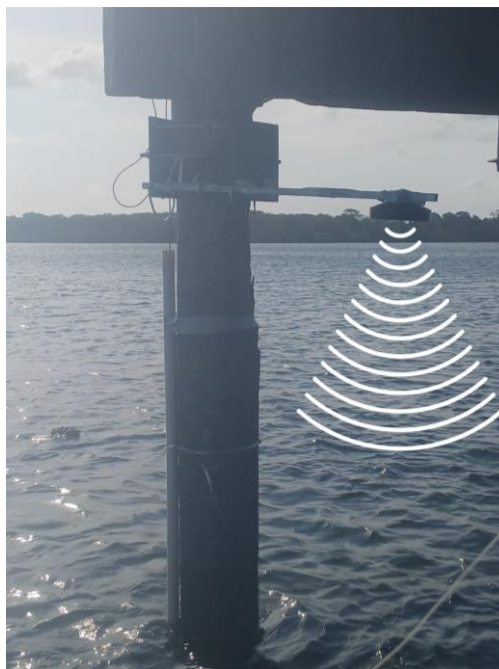


Figura 20 – Posicionamento do sensor ultrassônico (HC-SR04) para medir nível do mar. Fonte: Autor.

O antigo trapiche do ICMBio-Soure é um ponto ideal para a instalação dos equipamentos pois está a 55 metros de distância da margem, tornando-o um ponto livre de obstruções para a circulação do vento e da incidência solar no painel fotovoltaico. Neste ponto, ambos os sensores de nível conseguem mensurar a variação da maré sem que o CTDlog fique exposto ou que o sensor ultrassônico detecte a superfície do fundo durante a maré baixa. Além do mais, o local de instalação é de difícil acesso, sendo possível alcançar os equipamentos apenas com o auxílio de uma embarcação durante a maré alta, dificultando até mesmo possíveis furtos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EVENTUALIDADES OCORRIDAS DURANTE O PERÍODO DE TESTES

Durante o período de coleta, o desempenho do PMC foi limitado devido a problemas relacionados ao gerenciamento de carga. Como mencionado anteriormente, quando a estação está configurada para coletar dados a cada minuto, a conexão Wi-Fi e o modem 4G permanecem ligados, resultando em um alto consumo de energia. A Ilha do Marajó apresenta um regime pluviométrico bem definido, tendo uma estação chuvosa entre dezembro e maio (Lima *et al.* 2005), período em que a precipitação média ultrapassa 1900 mm (Inmet 2025a). Durante essa época, a cobertura de nuvens reduz significativamente a incidência de radiação solar sobre o painel fotovoltaico, limitando o fornecimento de energia para a bateria do PMC. Como consequência, o sistema de gerenciamento de carga frequentemente interrompia o fornecimento de energia ao equipamento para proteger a bateria, resultando em coletas intermitentes ao longo do período de teste. Nessas condições, o painel fotovoltaico recarregava a bateria lentamente até atingir a tensão mínima necessária para reativar o PMC, permitindo coletas, em média, por apenas cinco horas a cada ciclo de descarga da bateria. Como agravante, durante os momentos de precipitação, o PMC permaneceu desligado, impossibilitando a avaliação do funcionamento do seu pluviômetro.

O anemômetro operou normalmente nas primeiras horas após a instalação do PMC, mas, posteriormente, passou a registrar dados inconsistentes com a realidade. Diante disso, foi necessário removê-lo para análise em laboratório, onde se constatou que o ímã responsável pela detecção da velocidade angular pelo sensor AS5600, estava travado. O sensor de direção do vento, por sua vez, apresentou funcionamento adequado, porém, por depender do anemômetro, também foi removido para inspeção.

5.2 DESEMPENHO DOS SENSORES

5.2.1 Sensor de temperatura do ar

Tanto o sensor AM2302 quanto o HDC1080 apresentaram uma correlação de Pearson muito forte ($r \geq 0,9$) e um erro absoluto médio (EAM) da leitura em comparação com os valores de referência da EMC de $0,36^{\circ}\text{C}$ e $0,29^{\circ}\text{C}$, respectivamente, estando o AM2302 dentro do valor de acurácia informado pelo fabricante ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), enquanto o HDC1080 excedeu levemente o valor de acurácia ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). Os modelos de regressão linear dos sensores demonstraram um coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,9 indicando que a equação da reta se ajustou muito bem aos dados (**Figura 21a** e **Figura 21c**). O erro quadrático médio (RMSE) dos modelos foi abaixo de $0,20^{\circ}\text{C}$ e o erro percentual (%RMSE) inferiores a 0,7%, ou seja, os modelos de

regressão linear apresentam, em média, um desvio absoluto de até 0,2 °C em relação aos valores reais, o que representa menos de 0,7% da média dos dados observados, reforçando a qualidade dos modelos, sendo o HDC1080 o sensor que obteve o melhor desempenho. A análise dos resíduos indicou um resíduo absoluto médio (RAM) de 0,11 °C para o AM2302 (**Figura 21b**) e 0,09 °C para o HDC1080 (**Figura 21d**), com resíduos absolutos máximos (RAMax) para o AM2302 e HDC1080 de aproximadamente 1,26 °C e 1,0°C, respectivamente, indicando os erros máximos dos modelos. Porém, este valor máximo não se refere a um possível outlier²³.

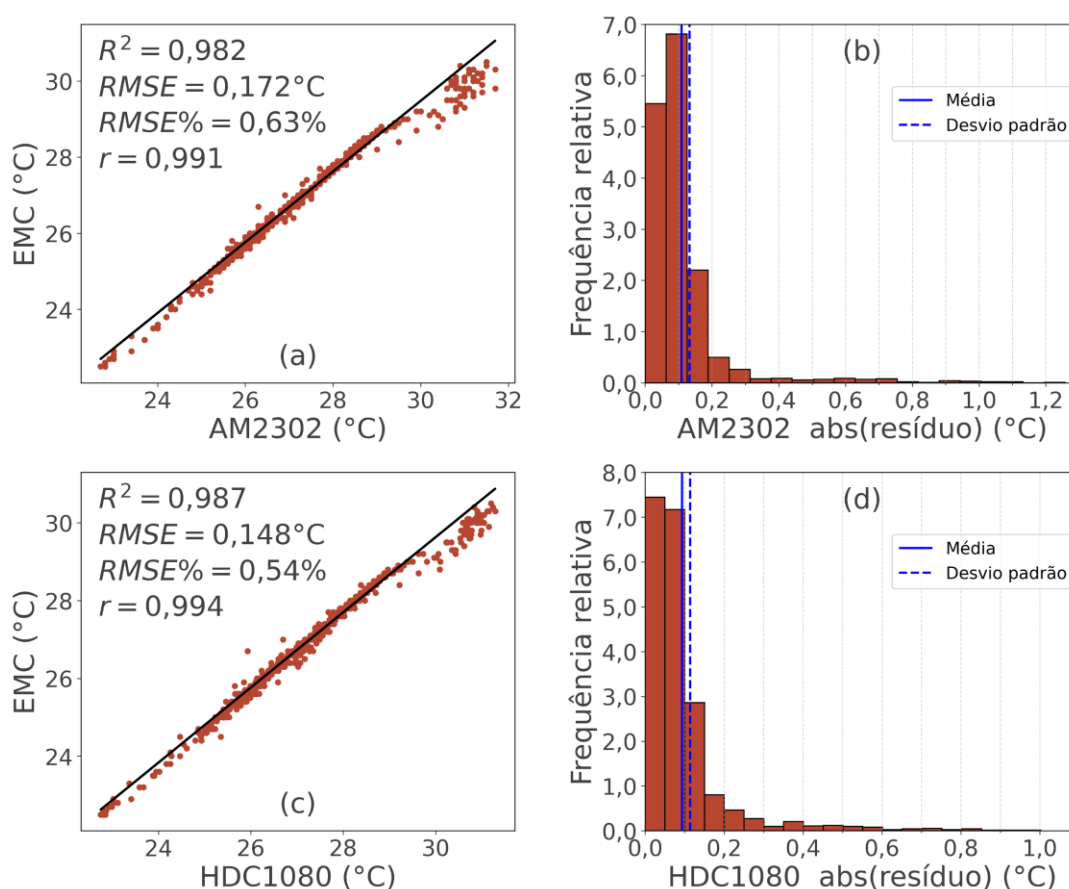


Figura 21 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de temperatura do ar. (a) Gráfico de dispersão do sensor AM2302 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor AM2302, com média = 0,11 °C e máxima = 1,26 °C. (c) Gráfico de dispersão do sensor HDC1080 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HDC1080, com média = 0,09 °C e máxima = 1°C. Fonte: Autor.

Em seu último teste, o PMC funcionou de forma contínua durante 1 dia e 11 horas, permitindo-o coletar dois períodos diurnos, sendo o restante dos dados coletados durante o período do final da tarde e noite devido ao problema de déficit de energia do equipamento. Com isso, o modelo de regressão linear, por mais que tenha retornado valores otimistas, não

²³ Valor que se desvia significativamente dos demais dados, podendo indicar erro ou evento incomum.

representa o cenário ideal, sendo necessário outra coleta dos dados com o sistema de energia do PMC funcionando de forma apropriada. Além disso, o abrigo meteorológico utilizado para os dois sensores foi impresso em ASA de cor preta, o que pode ter enviesado a leitura dos sensores no período de maior intensidade solar devido à maior absorção de radiação. Logo, para minimizar esse efeito e aumentar a reflectância, é necessário substituir o abrigo nas coletas futuras por outro modelo na cor branca, conforme recomendação de Tarara & Hoheisel (2007).

5.2.2 Sensor de umidade relativa

Ambos os sensores utilizados AM2302 e HDC1080 também são capazes de medir umidade relativa do ar. Durante o período de coleta, ambos registraram valores superiores a 99,98% por períodos prolongados. Esse comportamento levanta a hipótese de que os sensores possam ter sofrido interferência externa, seja por um encapsulamento inadequado dos sensores que permitiu a entrada de gotas de chuva, seja por sua elevada sensibilidade a ambientes com umidade próxima à saturação. Vale destacar que a própria EMC também registrou valores acima de 98% por longos períodos, o que sugere que os sensores de baixo custo podem ter captado dados compatíveis com as condições ambientais locais. Ainda assim, é necessário realizar novos testes com um encapsulamento mais eficiente, especialmente pelo fato de o PMC estar posicionado acima do rio, sendo um local com alta evaporação (**Figura 12**).

Do ponto de vista estatístico, o sensor AM2302 apresentou um grau de correlação forte ($0,6 \leq r < 0,9$), mas com R^2 pouco ajustado (0,605), RMSE de 3,459% e %RMSE de 4,05% (**Figura 22a**). O RAM foi de 2,52% e o RAMax atingiu 16,75% (**Figura 22b**), sugerindo instabilidade na coleta de dados de umidade. Já o sensor HDC1080, embora também tenha exibido correlação forte, apresentou um R^2 de 0,637, RMSE de 3,317% e %RMSE de 3,88% (**Figura 22c**), com RAM de 2,39% e RAMax de 17,08% (**Figura 22d**). Esses resultados corroboram as suspeitas levantadas anteriormente: a baixa confiabilidade na medição de umidade pode estar relacionada à exposição inadequada dos sensores no abrigo meteorológico, possuindo muitas perfurações nas laterais, permitindo maior contato com o ambiente externo, ou ainda à limitação técnica desses sensores para aplicações em ambientes externos com alta umidade e precipitação. Portanto, novas coletas, com melhorias no encapsulamento, são fundamentais para avaliar a viabilidade desses sensores.

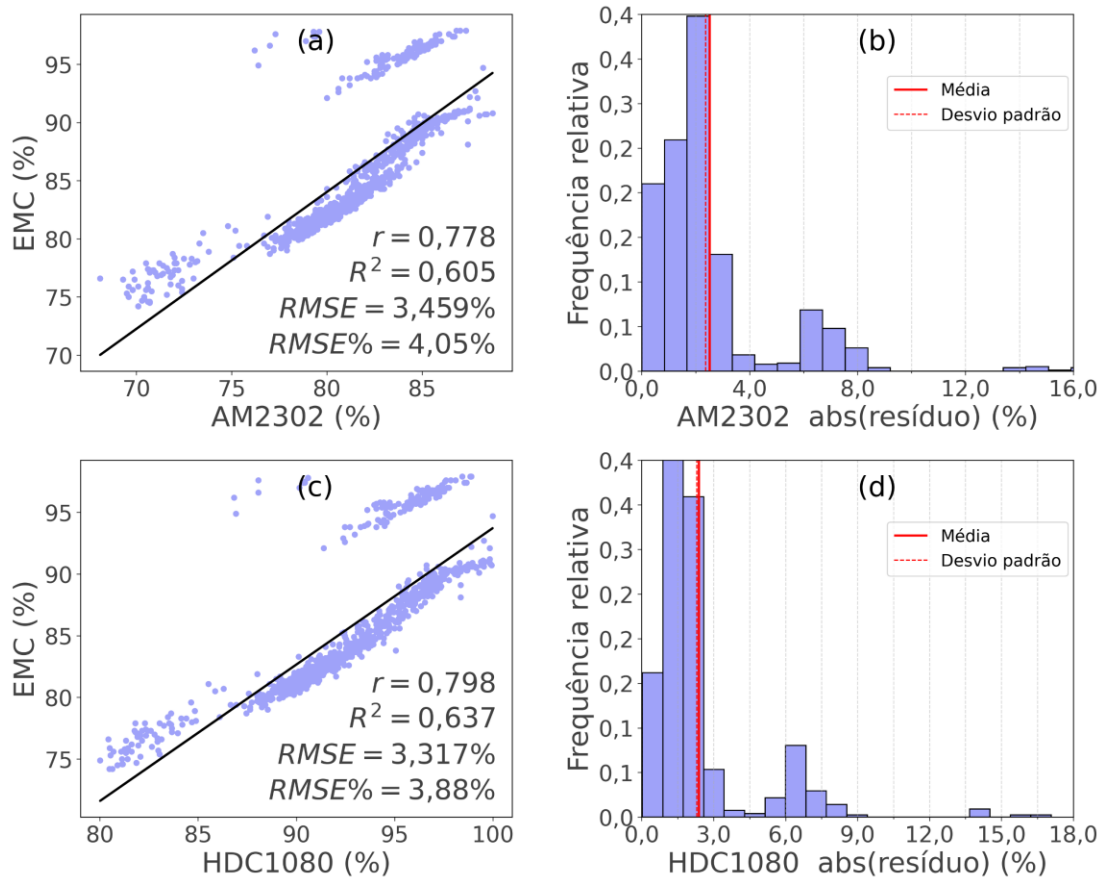


Figura 22 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de umidade relativa do ar. (a) Gráfico de dispersão do sensor AM2302 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor AM2302, com média = 2,52 % e máxima = 16,75 %. (c) Gráfico de dispersão do sensor HDC1080 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HDC1080, com média = 2,39% e máxima = 17,08%. Fonte: Autor.

O PMC esteve em operação durante o período chuvoso, cuja umidade relativa média na região de Soure é em torno de 80% (Inmet 2025a). Logo, caso os sensores AM2302 e HDC1080 de fato não sejam aptos a operarem em condições de alta umidade, é necessário realizar a substituição dos sensores por outros modelos mais confiáveis e que possuam capacidade para permanecer exposto em locais com umidade elevada, como no caso da região de Soure e de toda a região amazônica, mas que tenham a premissa de serem de baixo custo.

Um forte candidato para isto é o sensor SHT4xA, pois possui alta acurácia para medir dados de temperatura ($\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa ($\pm 2\text{ \%RH}$), projetado para operações adversas, como ambientes de condensação. Segundo o fabricante, este sensor passa por testes de confiabilidade em condições extremas de $85^{\circ}\text{C}/85\%$ por períodos prolongados (Sensirion 2024), indicando ter potencial para se utilizar em regiões com umidade elevada.

5.2.3 Sensor de pressão atmosférica

Assim como foi feito com a variável de temperatura e umidade relativa do ar, foram utilizados dois sensores de pressão barométrica (BMP280 e MS5611) para averiguar seu comportamento em relação à EMC. Por questões de erro na configuração da EMC, os valores de pressão atmosférica ficaram descalibrados, impedindo que fosse feita uma comparação de erro absoluto com os sensores barométricos do PMC, sendo possível apenas a comparação da variabilidade atmosférica ao longo do tempo para saber se ambos os sensores de teste percebem a mesma variação da pressão atmosférica ao longo do dia.

Como ilustrado na **(Figura 23a)** e **(Figura 23b)**, o sensor BMP280 retornou uma correlação forte, modelo de regressão linear moderadamente ajustado ($R^2 = 0,763$), RMSE de 0,652hPa, %RMSE de 0,06%, e RAM de 0,50hPa, indicando que o modelo não se ajustou adequadamente aos dados de referência. O sensor MS5611 também, não obteve valores satisfatórios, retornando um modelo menos ajustado que o BMP280, apresentando coeficiente de correlação forte, modelo de regressão linear pouco ajustado ($R^2 = 0,5893$), RMSE de 0,858hPa, %RMSE de 0,08%, e RAM de 0,60hPa **(Figura 23c)** e **(Figura 23d)**. O comportamento disperso dos sensores pode ser explicado pela influência da variabilidade térmica, visto que esta variável faz parte da equação barométrica (Berberan-Santos *et al.* 1997, Bodunov & Khokhlov 2021). Como os sensores estão armazenados dentro de uma caixa hermética e de coloração escura **(Figura 12)**, sua temperatura interna se distancia da temperatura ambiente, resultando em um desvio térmico (erro induzido pela elevação da temperatura interna do compartimento dos sensores), sendo mais acentuado no MS5611, visto que possui um coeficiente de deslocamento térmico de $0,3 \text{ hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Measurement Specialties 2017), em contraste ao BMP280, cujo coeficiente é significativamente menor, de $0,015 \text{ hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Bosch Sensortec 2021b). O desvio térmico fica mais evidente ao analisar o comportamento do erro dos sensores em função da temperatura **(Figura 24)**. Ambos demonstraram correlação forte com a temperatura e R^2 superior a 0,8, sendo que o erro do BMP280 pôde ser mais bem descrito com uma equação quadrática **(Figura 24b)**.

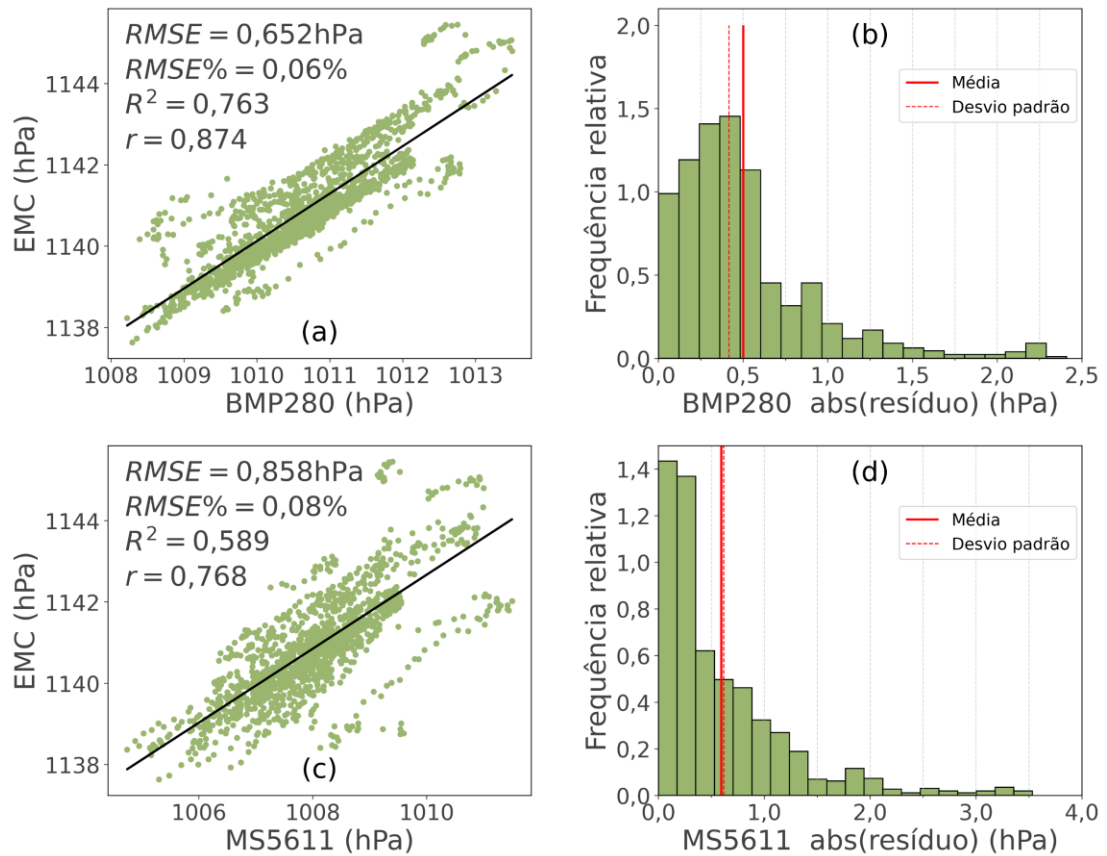


Figura 23 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de pressão barométrica. (a) Gráfico de dispersão do sensor BMP280 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor BMP280, com média = 0,50hPa e máxima = 2,41hPa. (c) Gráfico de dispersão do sensor MS5611 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor MS5611, com média = 0,60hPa e máxima de 3,53hPa. Fonte: Autor.

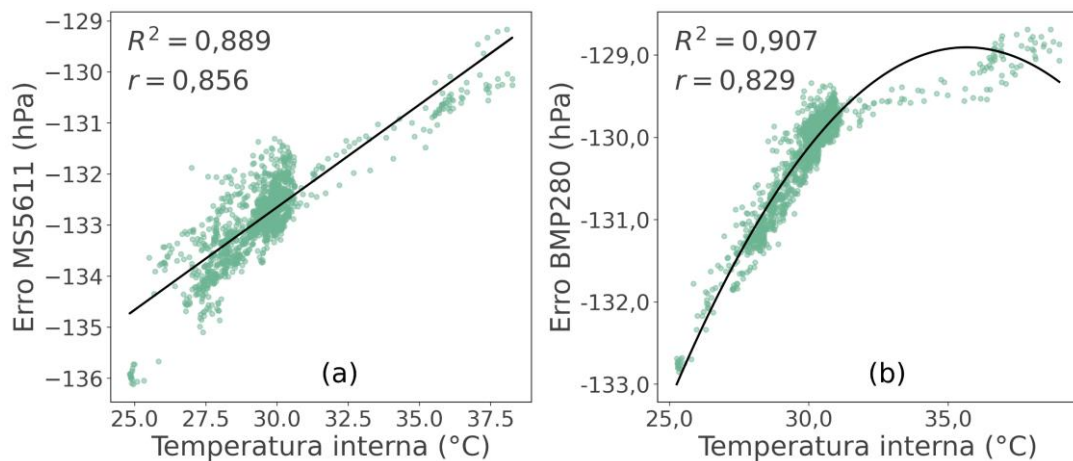


Figura 24 – Influência da temperatura interna sobre o erro dos sensores de pressão barométrica. (a) Regressão linear do MS5611. (b) Regressão polinomial de segunda ordem do BMP280. Fonte: Autor.

Após a aplicação das equações de regressão referentes ao erro térmico de cada sensor, foi possível corrigir os desvios e aprimorar os modelos de calibração. O novo modelo do BMP280 passou a apresentar uma correlação muito forte, com R^2 igual a 0,985, RMSE de 0,166 hPa e %RMSE de 0,01 % (**Figura 25a**). O RAM caiu para 0,11hPa e o RAMax para 0,77hPa (**Figura 25b**), uma melhora expressiva em relação ao valor inicial (**b**). O sensor MS5611 também apresentou ganhos de desempenho consideráveis após a correção do desvio térmico. O novo modelo, apresentou uma correlação muito forte, R^2 igual a 0,889, RMSE de 0,447 hPa, %RMSE de 0,04 %, RAM de 0,34hPa e RAMax de 2,02hPa (**Figura 25c** e **Figura 25d**), valor 43% inferior ao RAMax da primeira calibração (**Figura 23d**).

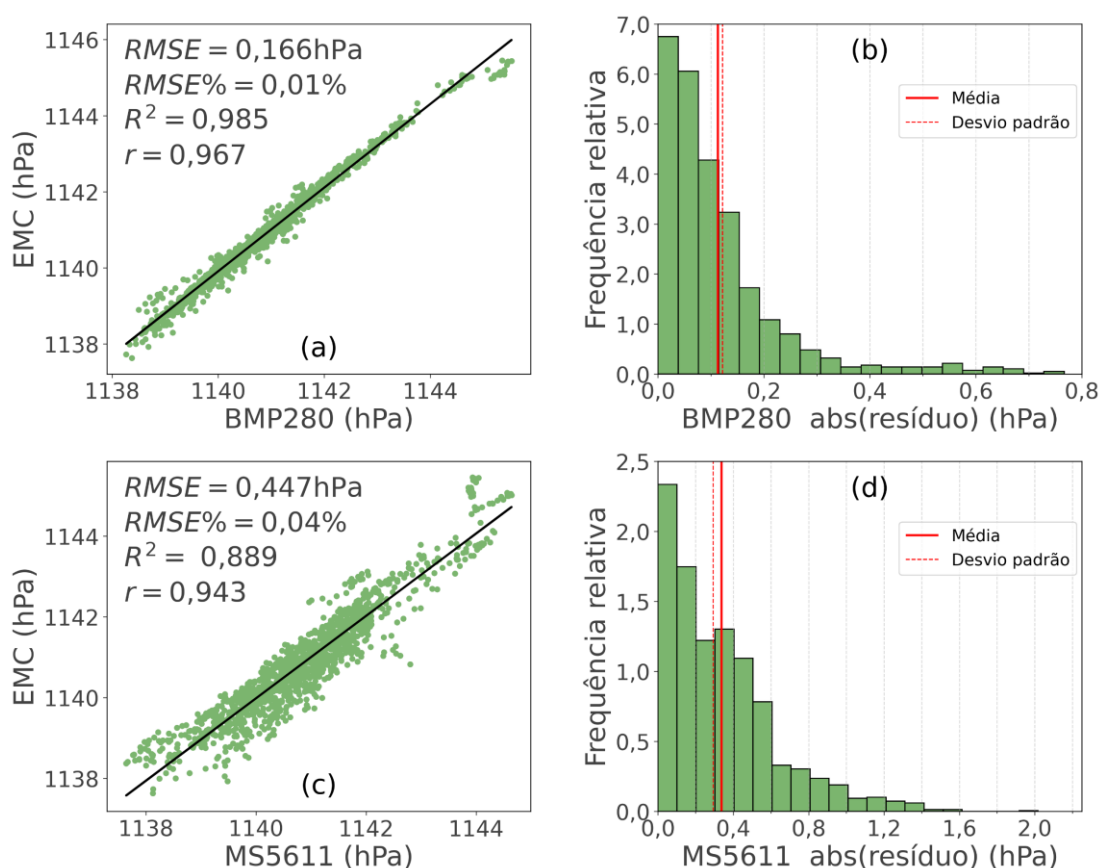


Figura 25 – Resultado dos modelos de regressão linear dos sensores de pressão barométrica após aplicado a correção térmica. (a) Gráfico de dispersão do sensor BMP280 e da EMC. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor BMP280, com média = 0,11hPa e máxima = 0,77hPa. (c) Gráfico de dispersão do sensor MS5611 e da EMC. (d) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor MS5611, com média = 0,34hPa e máxima de 2,02hPa. Fonte: Autor.

Dessa forma, torna-se necessário realizar outros testes em ambiente controlado para determinar, com maior precisão, a equação de desvio térmico de ambos os sensores, fazendo com que seja possível implementar esta equação nas leituras dos sensores e, posteriormente, o desenvolvimento de uma nova equação de calibração mais robusta e confiável. Além disso, um

potencial substituto para os sensores avaliados é o BMP390, uma versão aprimorada do BMP280, cuja acurácia é de 0,50 hPa (Bosch Sensortec 2021a), sendo 0,5 hPa mais preciso que o BMP280 e 1 hPa superior ao MS5611. Seu coeficiente de deslocamento térmico é de 0,006 hPa °C⁻¹, inferior ao dos modelos BMP280 (0,015 hPa °C⁻¹) e MS5611 (de 0,3 hPa °C⁻¹), o que o torna uma opção promissora para substituição no PMC.

5.2.4 Sensor de temperatura da água

Os valores de temperatura da água, apresentados na **Figura 26**, demonstram o comportamento do sensor DS18B20 em relação ao CTDlog (valor de referência). O DS18B20 apresentou EAM de 0,12°C e erro absoluto máximo (EAMax) de 0,5 °C (**Figura 26b**), indicando que o sensor está dentro do seu limite de acurácia informado pelo fabricante ($\pm 0,5$ °C). Além do mais, sua resolução máxima de 12 bits permite leituras de 0,0625 °C, o que limita a detecção de variações de temperatura em menor escala, sendo bem distante quando comparado ao CTDlog, que possui acurácia e resolução igual a $\pm 0,05$ °C e 0,003 °C respectivamente (AgSolve 2025). Todavia, o modelo de calibração para o DS18B20 apresentou resultados satisfatórios, com correlação muito forte, R^2 muito bem ajustado (0,938), RMSE de 0,036 °C e %RMSE de 0,12% (**Figura 26a**), indicando que o modelo erra, em média, abaixo de 0,04 °C. Ao analisar o comportamento residual (**Figura 26c**), o modelo retornou RAM de 0,021 °C, estando bem próximo do RMSE, e RAMax de 0.376 °C. De toda forma, o modelo de calibração obteve erros mínimos, tornando o DS18B20 uma alternativa de baixo custo para medir temperatura da água.

Outra alternativa para a medição da temperatura da água é o uso do sensor PT1000, um termorresistor de platina (RTD) conhecido por sua alta precisão, excelente resolução e resposta linear da resistência elétrica em função da temperatura. Estudos como o de Qin *et al.* (2013) demonstraram a eficácia desse sensor na medição do fluxo de calor marinho, destacando sua estabilidade e a capacidade de fornecer leituras de temperatura com alta resolução. Os sensores RTD são amplamente utilizados em aplicações de automação industrial e equipamentos médicos (Wang *et al* 2020), além de integrarem sistemas de monitoramento oceanográfico devido à sua confiabilidade em ambientes aquáticos (Stewart 2008). No mercado, diversas empresas fabricam sensores RTD, oferecendo modelos com diferentes especificações técnicas e faixas de preço, permitindo a seleção do sensor mais adequado para cada aplicação.

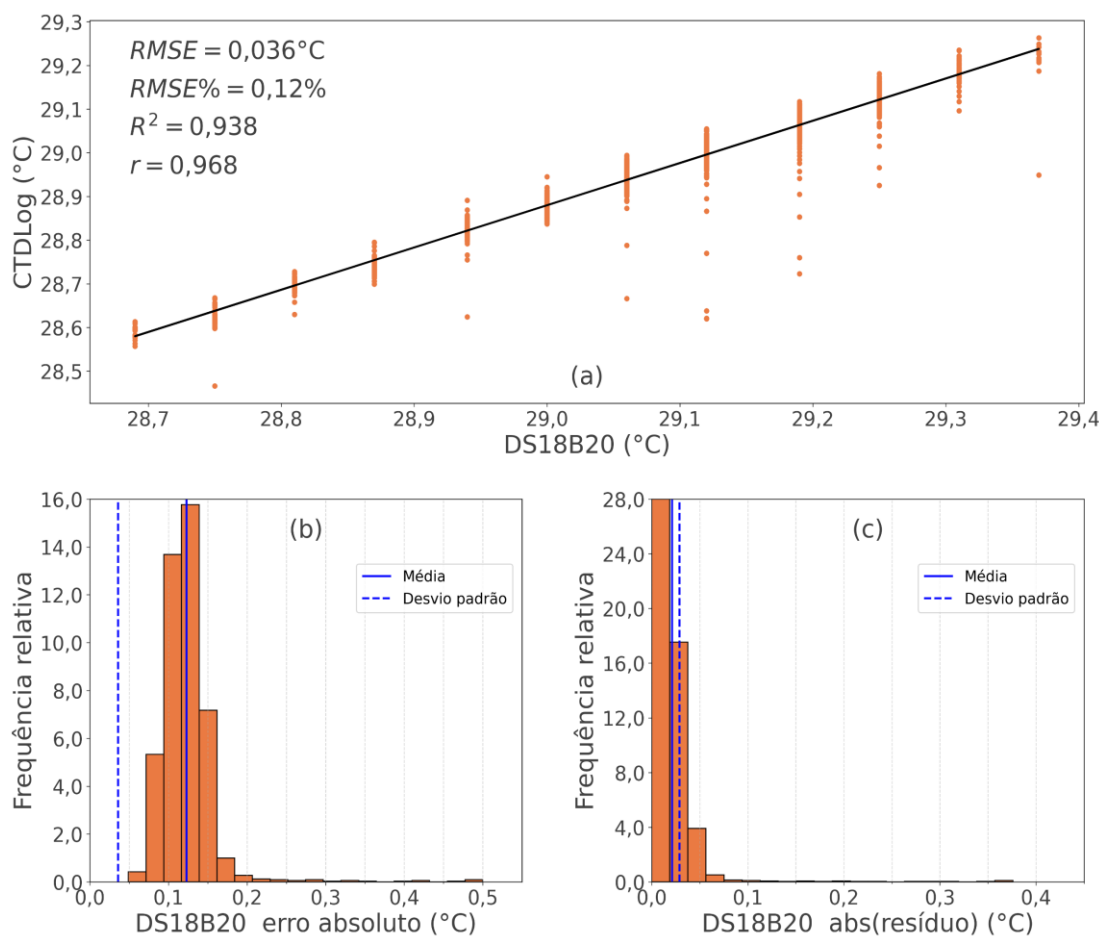


Figura 26 – Resultado do sensor de temperatura da água. (a) Gráfico de dispersão do sensor DS18B20 e do CTDlog. (b) Erro absoluto do sensor DS18B20 em relação ao CTDlog, com média = 0,12 °C e máxima = 0,5 °C. (c) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor DS18B20, com média = 0,021 °C e máxima = 0,376 °C. Fonte: Autor.

5.2.5 Sensor de nível da água

O parâmetro de nível da água demonstrou o melhor desempenho comparado com os sensores descritos anteriormente. A **Figura 27a** demonstra o comportamento do módulo HC-SR04 em relação ao sensor de referência (CTDlog), sendo possível observar uma correlação negativa entre os dois sensores. Esse comportamento é justificado pelas diferenças nos princípios de funcionamento de cada sensor. O CTDlog, instalado abaixo do nível de maré baixa, mede a altura da coluna d'água por meio de um sensor de pressão hidrostática. Ou seja, quanto maior o nível da água, maior a pressão registrada. Já o HC-SR04, posicionado acima do nível de maré alta, calcula a distância até a superfície da água utilizando ultrassom, retornando valores menores quando a maré está cheia, sendo o oposto válido. Logo, o comportamento dos dois sensores pôde ser facilmente descrito por um modelo de regressão linear, obtendo uma equação da reta decrescente, com uma correlação inversa e muito forte, R^2 igual a 0,999, indicando um excelente ajuste do modelo. O modelo retornou um RMSE de 0,026m (2,6 cm),

reforçando a precisão da calibração. Na **Figura 27b** é possível observar a distribuição do residual do modelo, com a maioria dos resíduos se concentrando próximo de zero, com RAM de 0,019m e RAMax de 0,175m.

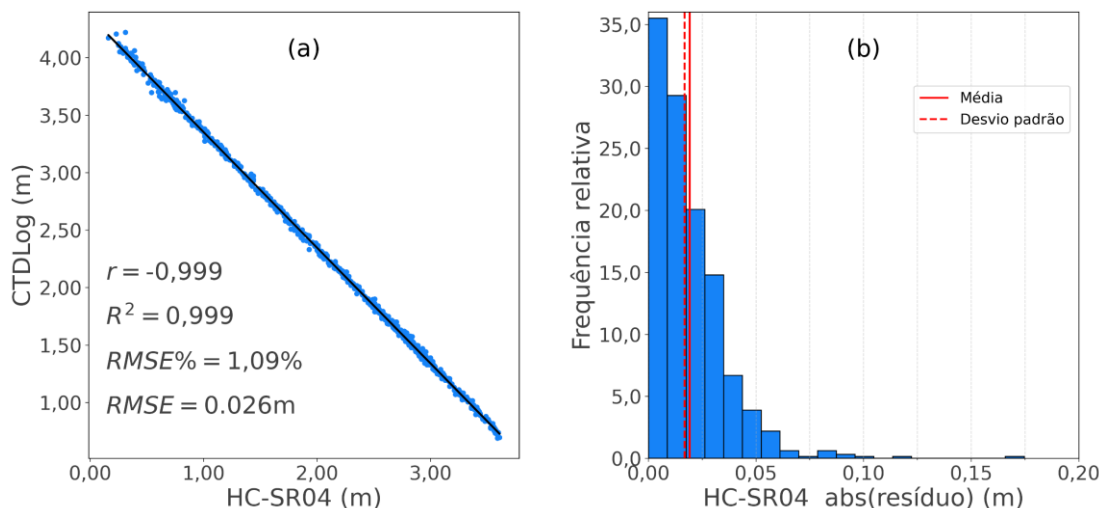


Figura 27 – Resultado do sensor de nível da água. (a) Gráfico de dispersão do sensor HC-SR04 e do CTDlog. (b) Distribuição dos resíduos absolutos do sensor HC-SR04, com média = 0,019 m e máxima = 0,175 m. Fonte: Autor.

Por mais que os resultados sejam otimistas, o módulo HC-SR04 possui um limite de medição de 2 centímetros a 4 metros (Sparkfun 2025), aumentando o erro de leitura fora desses limites. Durante o período de teste, o sensor retornou distância mínima e máxima de 0,16m e 3,61m, respectivamente, estando o sensor próximo do seu limite máximo durante a maré baixa. Em contrapartida, o sensor ficou muito próximo da maré alta, tornando-o vulnerável a ondas maiores geradas por tempestades ou embarcações durante este período. Nesse caso, é preciso que o sensor esteja instalado a uma distância segura da amplitude máxima da maré local. No local de teste do PMC, a amplitude de maré na região do rio Paracauari varia entre 3,6–4,7 metros, segundo estudo de Costa *et al.* (2013). Com isso, o módulo HC-SR04, apesar de ter tido um desempenho excelente, talvez não seja o sensor ideal de baixo custo para se utilizar em regiões de macromaré, pois pode retornar dados errôneos em distâncias acima de 4 metros.

Uma alternativa promissora ao HC-SR04 é o módulo JSN-SRT04T, capaz de medir distâncias entre 0,2m a 6m com acurácia de $\pm 0,01m$ (Manorshi 2025). Estas características o tornam adequados para instalação em regiões de macromaré. No entanto, para validar seu desempenho em campo, principalmente em comparação com sensores de referência como o CTDlog, é fundamental a realização de testes adicionais que avaliem sua precisão e estabilidade em condições reais de operação.

5.3 APLICABILIDADE E SUSTENTABILIDADE

A concepção do PMC prioriza a facilidade de manutenção e instalação. Assim, cada local deve ser analisado para garantir um design otimizado para o monitoramento desejado. No caso do trapiche do ICMBio-Soure, essa estrutura permitiu a implementação de um sensor ultrassônico para medição do nível da água, ao mesmo tempo em que evita interferências causadas por obstáculos ao fluxo de vento e à incidência solar (**Figura 28a**). No entanto, a instalação desse tipo de sensor em ambientes costeiros sem infraestrutura adequada, como trapiches, píeres, docas ou cais, torna-se inviável. Nessas condições, um sensor de pressão hidrostática, similar ao utilizado pelo CTDlog, seria a alternativa mais apropriada, com o PMC instalado na margem do rio e o sensor instalado abaixo do nível de baixa mar de sizígia, sendo ambos conectados via cabo submerso (**Figura 28b**). Além disso, é essencial que o local escolhido disponha de cobertura mínima de rede 3G para o envio dos dados ao banco de dados. Caso essa conectividade não esteja disponível, a coleta dos dados será restrita ao armazenamento local.

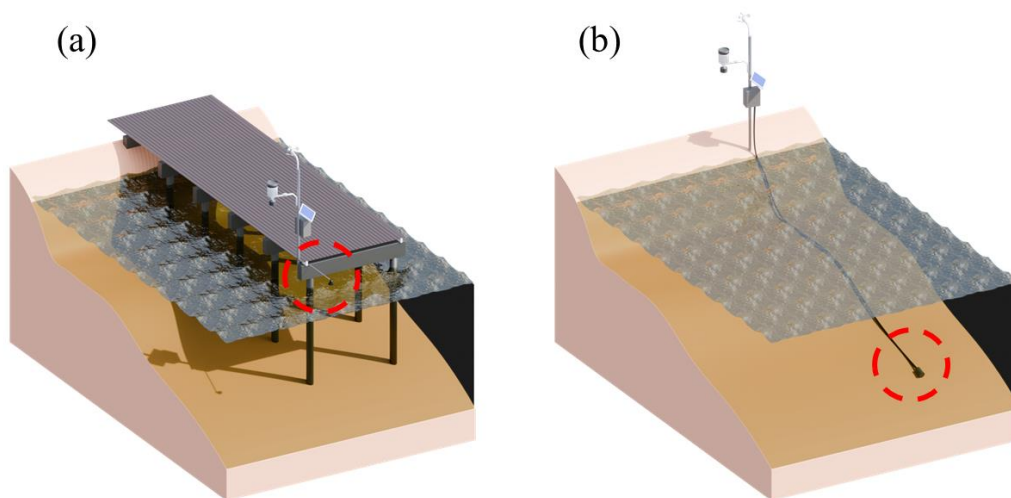


Figura 28 – Ilustração de duas possíveis instalações do PMC de acordo com o método de medição da variação da maré: (a) uso de um sensor ultrassônico em um trapiche e (b) o uso de um sensor de pressão hidrostática, sendo mais adequado para locais sem infraestrutura adequada. Fonte: Autor.

Assim como qualquer equipamento de monitoramento, é esperado que, em algum momento, um dos sensores do PMC fique inoperante. Esse fator reforça a escolha por sensores de baixo custo, visando reduzir os custos de manutenção. Além disso, os sensores são organizados em módulos independentes, o que facilita sua substituição. Esse processo pode ser realizado por qualquer pessoa que tenha recebido o treinamento adequado.

Nesse contexto, a logística de instalação e manutenção do PMC depende do local escolhido, podendo dificultar o envio de profissionais capacitados. Sendo assim, além de

contribuir para a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas, o PMC busca agregar conhecimento e fornecer informações essenciais às comunidades e povos tradicionais que mais necessitam. Em especial, os dados coletados são de grande importância para populações que dependem dos rios e mares para sua subsistência (Alves & Justo 2011, Farias *et al.* 2015, Funatsu *et al.* 2019, Pantoja *et al.* 2024). Logo, aproximar essas comunidades das unidades de monitoramento não apenas otimiza a logística de manutenção da rede, mas também fortalece a participação local. Com a devida capacitação sobre o funcionamento, manutenção e interpretação dos dados, essas comunidades podem integrar ativamente a uma rede de monitoramento participativo.

O monitoramento participativo é um método de coleta e análise de dados que envolve comunidades situadas na região monitorada, permitindo que moradores e usuários contribuam ativamente por meio de observações, medições e percepções locais. Um exemplo desse tipo de monitoramento empregado no Brasil é o *Monitoramento Participativo da Biodiversidade*, um dos principais projetos de monitoramento participativo (Tófoli *et al.* 2019, 2022). Essa abordagem auxilia a comunidade científica na ampliação do monitoramento ambiental e na compreensão dos fenômenos estudados. Logo, a integração dessas comunidades junto com um sistema de monitoramento contínuo de parâmetros meteorológicos e oceanográficos, não só contribuirá para as suas percepções ambientais como também irá fomentar o engajamento da comunidade em relação a tomadas de decisão.

Os dados fornecidos pelo PMC podem contribuir para o avanço do conhecimento científico, a conscientização ambiental e a compreensão das mudanças climáticas. Além disso, docentes podem utilizar os dados do PMC em suas aulas de ciências para engajar os alunos e formar uma nova geração mais consciente das questões ambientais e alinhadas aos objetivos do desenvolvimento sustentável. No meio acadêmico, uma futura rede de monitoramento, desenvolvida a partir do PMC, pode desempenhar um papel fundamental na criação de um novo banco de dados em tempo real, ampliando o conhecimento científico sobre a ZCA e auxiliando na elaboração de planos de mitigação frente aos impactos das mudanças climáticas.

A implementação dessa rede de monitoramento pode contribuir para o mapeamento das tendências do nível do mar e a identificação das áreas mais vulneráveis a inundações resultantes da dinâmica das marés. Na ilha do Marajó, estudos indicam que um aumento de 2 metros no nível do mar resultaria na inundação permanente de 986,14 km², o que corresponde a 2,51% da área total da ilha (39.292 km²), sendo os municípios de Cachoeira do Arari e Soure os mais impactados. Esse cenário favorece a intrusão salina, a redução das áreas de manguezais e,

consequentemente, a intensificação da erosão costeira . Tais impactos comprometem a biodiversidade local e reduzem os recursos disponíveis para as comunidades costeiras, forçando sua migração para áreas mais internas.

Sendo assim, os dados coletados a longo prazo, aliados ao monitoramento participativo, desempenham um papel fundamental na elaboração de novos planos de gestão ambiental, visando propor soluções para o controle e mitigação dos impactos em áreas já afetadas e naquelas com risco futuro. Além disso, esses planos serão essenciais para a discussão e implementação de novas políticas públicas voltadas à proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável das comunidades ribeirinhas. O envolvimento da comunidade, aliado à sua percepção do ambiente, contribuirá significativamente para a avaliação da efetividade dessas políticas (Sales *et al* 2023).

5.4 CUSTOS E VIABILIDADE

Como explicado anteriormente, o PMC demonstrou um grande potencial para a implementação de uma nova rede de monitoramento da ZCA. Todavia, são necessários testes adicionais de longo prazo para validar seu desempenho e estabelecer intervalos adequados de manutenção das estações. O projeto do PMC foi pensado para facilitar a manutenção de seus sensores e módulos, favorecendo o treinamento e a integração das comunidades locais que poderão se beneficiar das informações geradas. Logo, a parceria das comunidades na manutenção do PMC pode contribuir significativamente para a redução de custos logísticos, eliminando a necessidade de deslocamento de equipes técnicas especializadas e exigindo apenas o envio dos componentes a serem substituídos. Ainda assim, é imprescindível uma avaliação detalhada dos custos de produção do equipamento.

Para isso, o custo de fabricação do PMC apresentado na **Tabela 1**, foi comparado com valores de equipamentos já utilizados no mercado. A **Tabela 4** apresenta alguns equipamentos meteorológicos disponíveis no mercado. Com base no valor de custo do PMC (R\$ 952,75), é possível observar que o PMC custa apenas 33,67% do valor da estação de menor custo listada, 13,81% em relação ao valor da EMC e 3,27% do valor da estação de maior custo.

Tabela 4 – Custos de modelos de estações meteorológicas disponíveis no mercado e sua diferença de preço em relação ao custo de produção do PMC (R\$ 952,75). Valores cotados em março de 2025 e não incluem frete e impostos.

Modelo	Valor (R\$)	Diferença (R\$)	Economia (%)
Novotest FT0320*	2830,00	1877,25	66,33
Estação WH2910c**	3750,00	2797,25	74,59
Estação CICLUS PRO (EMC)***	6897,00	5944,25	86,19
Estação WH2910i**	6990,00	6037,25	86,37
WS22 – Plugfield****	10800,00	9847,25	91,18
Davis Vantage Vue (WiFi)**	12100,00	11147,25	92,13
Davis Vantage Pro2**	29100,00	28147,25	96,73

* Tecnoferramentas Comercial Importação e Exportação Ltda

** Clima e Ambiente Comércio e Serviços Ltda.

***Ciclus Estações Meteorológicas Ltda.

****E-Agro Soluções em Comércio Eletrônico S.a.

Cabe ressaltar que as estações apresentadas na **Tabela 4** possuem mais parâmetros de medição quando comparado com o PMC, como por exemplo o sensor de irradiância solar. Porém este parâmetro pode ser implementado ao PMC em versões futuras. Nesse sentido, Cruz-Colon *et al.* (2012) desenvolveram um medidor de irradiância solar de baixo custo utilizando painéis fotovoltaicos, substituindo o piranômetro, sendo este um sensor de alto custo. Este recurso mantém a premissa do PMC de ser uma alternativa de baixo custo e eficiente para o monitoramento ambiental.

Em relação à medição da variação da maré e da temperatura da água, os custos do PMC foram comparados aos de equipamentos com finalidades semelhantes, conforme apresentado na **Tabela 5**. Observa-se que o PMC é aproximadamente oito vezes mais barato que o modelo Baro Diver e cerca de 26 vezes mais econômico que o CTDlog, equipamento de maior custo entre os listados. Entretanto, vale destacar que o CTDlog inclui sensor de condutividade elétrica, o que contribui para seu valor elevado, sendo este um parâmetro não incorporado ao PMC. Dessa forma, o modelo Sonlist Levellogger 5 é o mais apropriado para comparação direta. Ainda assim, o PMC representa apenas 9,24% do custo necessário para aquisição do Sonlist Levellogger 5.

Tabela 5 – Custos de equipamentos disponíveis no mercado para coletar temperatura e nível da água e sua diferença de preço em relação ao custo de produção do PMC (R\$ 952,75). Valores cotados em maio de 2023 e não incluem frete e impostos.

Modelo	Valor	Diferença (R\$)	Economia (%)
Van Essen Instruments - Baro Diver*	7500,00	6547,25	87,30
Van Essen Instruments - TD-Diver*	8700,00	7747,25	89,05
Sonlist - Levellogger 5**	10313,59	9360,84	90,76
Van Essen Instruments - Micro-Diver*	11500,00	10547,25	91,72
Van Essen Instruments - Cera-Diver*	13300,00	12347,25	92,84
Sonlist Levellogger 5 LTC (CTDlog)**	24677,29	23724,54	96,14

*Water Services and Technologies Ltda.

** Ag Solve - Monitoramento Ambiental Ltda.

Vale ressaltar que os modelos analisados apresentam funcionamento semelhante ao do CTDlog. Nesse contexto, uma alternativa mais robusta e profissional para a medição de maré por meio de ultrassom seria a utilização do sensor MB7066, fabricado pela MaxBotix Inc, sendo capaz de alcançar até 10 metros de distância e com acurácia de $\pm 1\%$ FS²⁴, superando o alcance de 4 metros do sensor HC-SR04. Além disso, conta com proteção IP67²⁵, o que o torna ideal para aplicações em monitoramento de marés e em tanques industriais (MaxBotix Inc 2025).

Considerando o valor do MB7066 em torno de US\$ 115,12 (equivalente a R\$ 660,79 com a cotação do dólar em R\$ 5,74) e adicionando os tributos de importação²⁶, o custo total do sensor é de aproximadamente R\$ 1.236,99, sendo um valor mais que o dobro do necessário

²⁴ Full Scale (escala completa). Significa que a acurácia do sensor corresponde a 1% do valor máximo lido (10 metros). Ou seja, o sensor possui uma acurácia de $\pm 0,1$ metros.

²⁵ Certificação internacional que indica que o produto é resistente à poeira e água.

²⁶ 60% sobre o valor do produto e ICMS (17% para o estado do Pará) (Receita Federal 2024).

para a construção do PMC e cerca de 120 vezes superior ao custo do HC-SR04 (R\$ 10,27). Entretanto, mesmo com a substituição do HC-SR04 pelo MB7066, o custo total do PMC seria de R\$ 2.179,47, ainda assim mantendo-se 70% mais barato que o modelo de menor custo apresentado na **Tabela 5**.

Outro aspecto de destaque do PMC é sua capacidade de processar e transmitir dados em tempo real. O banco de dados, hospedado na plataforma Firebase, permite fácil integração com aplicativos web e mobile, possibilitando o desenvolvimento de ferramentas acessíveis para diferentes públicos, podendo beneficiar usuários cotidianos, como extrativistas e monitoradores ambientais. Além disso, como dito anteriormente, essa tecnologia pode ser aplicada em contextos educacionais, por meio de aplicativos voltados à sensibilização e ao ensino de ciência ambiental em escolas, promovendo o engajamento com o conhecimento científico. Outra aplicação potencial envolve o desenvolvimento de sistemas de alerta climático, que poderiam apoiar a gestão de riscos por parte de pescadores e outras populações vulneráveis, aumentando a segurança e a capacidade de resposta diante de eventos extremos.

Essa funcionalidade representa uma vantagem significativa em relação aos equipamentos listados na **Tabela 5**, os quais requerem instalação temporária durante cada campanha de coleta e posterior remoção para obtenção dos dados. Esse processo, além de aumentar a complexidade logística, diminui a rapidez da disponibilidade das informações e exige inserção manual das informações no banco de dados, elevando os custos operacionais, especialmente com deslocamentos até as áreas monitoradas. Nesse sentido, o PMC se destaca por permitir um fluxo contínuo de dados e por reduzir os custos associados à coleta tradicional, tornando-se uma alternativa viável e eficiente para o monitoramento ambiental em áreas remotas ou de difícil acesso.

Dessa forma, observa-se que, mesmo com a adoção de um sensor ultrassônico de maior valor agregado, o PMC permanece significativamente mais acessível do que a soma dos custos de aquisição de uma estação meteorológica e de equipamentos para medir nível e temperatura da água. Sua proposta de baixo custo, aliada à sua capacidade de transmissão de dados em tempo real e à adaptabilidade a diferentes contextos operacionais, reforça o potencial do PMC como uma solução viável e econômica para ampliar o monitoramento na ZCA.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo (PMC) para monitoramento ambiental em tempo real das áreas da ZCA que carecem de dados ambientais. Os resultados mostraram que o protótipo apresenta potencial para compor uma nova rede de monitoramento em tempo real, embora melhorias ainda sejam necessárias. A maioria dos sensores utilizados demonstrou bom desempenho. O HDC1080 foi o mais eficaz na medição da temperatura do ar, porém, assim como o AM2302, não é indicado para ambientes altamente úmidos. Já o DS18B20 se destacou na medição da temperatura da água, com baixa margem de erro e alta confiabilidade estatística, enquanto o HC-SR04, sensor de nível da água, apresentou ótimo desempenho em relação ao sensor de referência (CTDlog), sendo promissor para regiões com regime de mesomaré. Para locais com maiores amplitudes, o sensor ultrassônico JSN-SRT04T é uma alternativa viável.

Os sensores de pressão atmosférica (BMP280 e MS5611) apresentaram limitações relacionadas à temperatura interna elevada do PMC, enviesando as leituras. A substituição por sensores com menor coeficiente de deslocamento térmico, como o BMP390, é recomendada. Já o anemômetro teve mau funcionamento por problemas mecânicos e o sensor de direção do vento, embora operacional, depende do anemômetro, exigindo novos testes em laboratório. Outro ponto crítico foi o déficit energético durante o período chuvoso, resultando na baixa incidência solar no painel fotovoltaico. Somado a isso, o PMC esteve configurado para operar em alta frequência, aumentando o consumo de energia e prejudicando a coleta contínua de dados. Devido a este empecilho, a avaliação do pluviômetro foi impossibilitada. Apesar disso, o PMC demonstrou capacidade de reinicialização automática, o que assegura sua retomada de operação após recarga da bateria pelo painel fotovoltaico.

Com um custo significativamente inferior ao de equipamentos convencionais e manutenção simplificada, o PMC se mostra promissor para integrar a iniciativas de monitoramento participativo em comunidades ribeirinhas. Sua adoção pode ampliar o acesso a dados ambientais de qualidade, fundamentais para o planejamento territorial e a formulação de políticas públicas eficazes. A expansão de uma rede de monitoramento baseada em versões aprimoradas do PMC representa um avanço estratégico para a mitigação e prevenção de impactos ambientais na ZCA, especialmente em áreas vulneráveis às mudanças climáticas. Além disso, os dados gerados contribuirão com estudos acadêmicos voltados à compreensão da dinâmica ambiental costeira amazônica e subsidiarão ações voltadas à conservação dos ecossistemas, proteção das populações tradicionais e fortalecimento de políticas públicas.

REFERÊNCIAS

- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). 2024. *Effects of ocean and coastal acidification on marine life*. Disponível em: <https://www.epa.gov/ocean-acidification/effects-ocean-and-coastal-acidification-marine-life>. Acesso em: 15/02/2025.
- AgSolve. 2025. *Medidor de nível, temperatura e condutividade Levellogger – LTC 5*. Disponível em: <https://www.agsolve.com.br/produto/1178/medidor-de-nivel-temperatura-e-condutividade-levellogger-ltc-5>. Acesso em: 08/03/2025
- Alam M. 2023. *Interface MS5611 barometer & altimeter sensor with arduino*. Disponível em: <https://how2electronics.com/interface-ms5611-barometer-altimeter-sensor-with-arduino>. Acesso em: 07/03/2025
- Alam M. 2025. *How to use HC-SR04 ultrasonic distance sensor with arduino*. Disponível em: <https://how2electronics.com/how-to-use-hc-sr04-ultrasonic-distance-sensor-with-arduino>. Acesso em: 09/02/2025
- Almeida R. M. A., Moraes C. H. V., Seraphim T. F. P. 2016. *Programação de sistemas embarcados: desenvolvendo software para microcontroladores em linguagem C*. Rio de Janeiro, Elsevier, 488 p.
- Alves A. D. & Justo J. S. 2011. *Espaço e subjetividade: estudo com ribeirinhos*. *Psicologia & Sociedade*, **23**(1):181–189.
- AMS Osram. 2018. *Ams AS5600 position sensor*. Disponível em: <https://look.ams-osram.com/m/7059eac7531a86fd/original/AS5600-DS000365.pdf>. Acesso 21/01/2025.
- Aosong. 2015. *Temperature and humidity module. AM2302 product manual*. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/830/AM2302_manual-2487540.pdf. Acesso em: 01/02/2025.
- Arduino e Cia. 2018. *Sensor de temperatura HDC1080 com arduino*. Disponível em: <https://www.arduinoecia.com.br/sensor-temperatura-umidade-hdc1080-arduino>. Acesso em: mar 2025
- Beardsley R. C., Candela J., Limeburner R., Geyer W. R., Lentz S. J., Castro B. M., Cacchione D., Carneiro N. 1995. The M2 tide on the Amazon Shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **100**(C2):2283–2319. <https://doi.org/10.1029/94JC01688>
- Bento G. M. & Santos R. T. 2018. Avaliação de métodos de remoção de outliers e seus impactos na precisão dos métodos de interpolação. *1º Simpósio Mato-grossense de Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão*. 1º Simpósio Mato-grossense de Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão.
- Berberan-Santos M. N., Bodunov E. N., Pogliani L. 1997. On the barometric formula. *American Journal of Physics*, **65**(5):404–412. <https://doi.org/10.1119/1.18555>.
- Bodunov E. N. & Khokhlov G. 2021. Barometric formula for non-isothermal atmosphere. *Journal of Physics: Conference Series*, **2131**(2):022053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/2/022053>.

Bosch Sensortec. 2021a. *BMP390: digital pressure sensor*. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp390-ds002.pdf>. Acesso em: 08/02/2025.

Bosch Sensortec. 2021b. *BMP280: Digital pressure sensor*. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp280-ds001.pdf>. Acesso em: 01/09/2024.

Botero-Valencia J. S., Mejia-Herrera M., Pearce J. M. 2022. Design and implementation of 3-D printed radiation shields for environmental sensors. *HardwareX*, **11**:e00267. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00267>.

Boulhosa M. B. M. & Souza-Filho P. W. M. 2009. Reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros para geração de mapas de ISA ao derramamento de óleo, Amazônia oriental. *Revista Brasileira de Geofísica*, **27**(1):23-27. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2009000500003>.

Calazans D. (ed.). 2011. *Estudos oceanográficos: do instrumental ao prático*. Pelotas, Editora Textos, 462p.

Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). 2025. *Cartas náuticas*. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-nauticas>. Acesso em: 24/01/2025.

Costa K. G., Bezerra T. R., Monteiro M. C., Vallinoto M., Berrêdo J. F., Pereira L. C. C., Costa R. M. 2013. Tidal-induced changes in the zooplankton community of an Amazon Estuary. *Journal of Coastal Research*, **29**(4): 756–765. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00166.1>

Cruz-Colon J., Martinez-Mitjans L., Ortiz-Rivera E. I. 2012. Design of a low-cost irradiance meter using a photovoltaic panel. In: 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anais[...]. Austin, p. 002911–002912. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6318195>

Camargo E. T., Spanhol F. A., Slongo J. S., Silva M. V. R., Pazinato J., Lobo A. V. L., Coutinho F. R., Pfrimer F. W. D., Lindino C. A., Oyamada M. S., Martins L. D. 2023. *Low-cost water quality sensors for IoT: a systematic review*. *Sensors*, **23**(9):4424. <https://doi.org/10.3390/s23094424>

Dominguez J. M. L. 2009. The coastal zone of Brazil. In: Dillenburg S.R. & Hesp P.A. (ed.). *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Springer, Berlin, Heidelberg, p.17-51. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_2

Eletrogate. 2018. *Conhecendo o ESP32—introdução*. Disponível em: <https://blog.eletrogate.com/conhecendo-o-esp32-introducao-1>. Acesso em: 08/11/2024.

El-Robrini M., Ranieri L. A., Silva P. V. M., Guerreiro J. S., Alves M. A. M. S., Oliveira R. R. S., Silva M. do S. F., Amora P. B. C., El-Robrini M. H. S., Fenzl N., Farias D. R. 2018. Panorama da erosão costeira — Pará. In: Muehe D. (ed.). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente (MMA), p. 65-165. Disponível em: https://www.bivica.org/files/5975_11.%20TerraMar_Panorama%20da%20Eros%C3%A3o%20Costeira%20do%20Brasil_PDF.pdf. Acesso em: 22/02/2025.

El-Robrini M., Santos J. H. S., Lima L. G., Santos A. L. S., Santos M. C. F. V., Souza U. D. V. 2018. Panorama da erosão costeira — Maranhão. In: Muehe D. (ed.). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente (MMA), p. 167-239. Disponível em:

https://www.bivica.org/files/5975_11.%20TerraMar_Panorama%20da%20Eros%C3%A3o%20Costeira%20do%20Brasil_PDF.pdf. Acesso em: 23/02/2025.

Espressif System. 2025. *ESP32 series datasheet*. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 18/01/2025.

Farias G. G., Silva E. P., Correia G. B. 2015. *Usos do território e modo de vida ribeirinho na Amazônia Paraense: o caso da comunidade Menino Deus em Portel-Pa*. *Boletim Amazônico de Geografia*, **2**(3):138–152. <https://doi.org/10.17552/2358-7040/bag.v2n3p138-152>

Fernandes M. E. B., Oliveira F. P., Eyzaguirre I. A. L. 2018. *Mangroves on the Brazilian Amazon Coast: uses and rehabilitation*. In: Makowski C. & Finkl C. (ed.). *Threats to mangrove forests*. Springer International Publishing, p. 621-635. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73016-5_29.

Ficke A. D., Myrick C. A., Hansen L. J. 2007. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **17**(4):581–613. <https://doi.org/10.1007/s11160-007-9059-5>

Franz G., Garcia C. A. E., Pereira J., Assad L. P. F., Rollnic M., Garbossa L. H. P., Cunha. L. C., Lentini C. A. D., Nobre P., Turra A., Trotte-Duhá J. R., Cirano M., Estefen S. F., Lima J. A. M., Paiva A. M., Noernberg M. A., Tanajura C. A. S., Moutinho J. L., Campuzano F., Pereira E. S., Lima A. C., Mendonça L. F. F., Nocko H., Machado L., Alvarenga J. B. R., Martins R. P., Böck C. S., Toste R., Landau L., Miranda T., Santos F., Pellegrini J., Juliano M., Neves R., Polejack A. 2021. *Coastal ocean observing and modeling systems in Brazil: initiatives and future perspectives*. *Frontiers in Marine Science*, **8**(681619):1-25. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681619>.

Funatsu B. M., Dubreuil V., Racapé A., Debortoli N. S., Nasuti S., Tourneau F. M. L. 2019. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Global Environmental Change*, **57**:101923. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.007>

Gelfan A. N. 2023. *Climate change and threats to water security: a review*. *Water Resources*, **50**(5): 645–663. <https://doi.org/10.1134/S0097807823600547>

Géron A. 2019. *Hands-on machine learning with scikit-learn, keras, and tensorflow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems*. Sebastopol, O'Reilly, 856 p.

Giffard P., Llovel W., Jouanno J., Morvan G., Decharme B. 2019. Contribution of the Amazon River discharge to regional sea level in the Tropical Atlantic Ocean. *Water*, **11**(11):2348. <https://doi.org/10.3390/w11112348>

Gillett D. & Marchiori A. 2019. A low-cost continuous turbidity monitor. *Sensors*, **19**(14):3039. <https://doi.org/10.3390/s19143039>

Griggs G. & Reguero B. G. 2021. Coastal adaptation to climate change and sea-level rise. *Water*, **13**(16):2151. <https://doi.org/10.3390/w13162151>

- Gunawardena N., Pardyjak E. R., Stoll R., Khadka A. 2018. Development and evaluation of an open-source, low-cost distributed sensor network for environmental monitoring applications. *Measurement Science and Technology*, **29**(2):024008. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa97fb>
- Guse R. 2024. *Monitore a temperatura e pressão a distância com sensor BMP280*. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/monitoramento-de-temperatura-e-pressao-a-distancia-com-sensor-bmp280>. Acesso em: 02/03/2025.
- Habibullah M. S., Din B. H., Tan S. H., Zahid H. 2022. *Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence*. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(1):1073–1086. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15702-8>
- Henriques R. J., Oliveira F. S., Schaefer C. E. G. R., Lopes P. R. C., Senra E. O., Lourenço V. R., Francelino M. R. 2024. Impacts of anthropocene sea-level rise on people, environments, and archaeological sites in Marajó Island, Brazilian Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, **136**:104836. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104836>
- Hu X. & Cai W. J. 2013. *Estuarine acidification and minimum buffer zone—a conceptual study*. *Geophysical Research Letters*, **40**(19):5176–5181. <https://doi.org/10.1002/grl.51000>
- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2024. *Resex Marinha de Soure é a primeira área protegida do Brasil a ser reconhecida na Lista Verde da IUCN*. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/resex-marinha-de-soure-e-a-primeira-area-protegida-do-brasil-a-ser-reconhecida-na-lista-verde-da-iucn>. Acesso em: 04/03/2025.
- Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). 2025a. Banco de dados meteorológicos. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 03/03/2025
- Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). 2023. *O que é zona de convergência intertropical? Entenda agora*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/zona-de-convergencia-intertropical-zcit>. Acesso em: 12/01/2025.
- Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). 2025b. *Sobre meteorologia*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia>. Acesso em: 03/03/2025
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ipcc). 2023. *Sections*. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jacques C. & Sidia M. 2003. Correlação linear simples. In: Jacques C. & Sidia M. (ed.). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Porto Alegre, Artmed, p. 84-93.
- Khondoker M., Mandal S., Gurav R., Hwang S. 2023. *Freshwater shortage, salinity increase, and global food production: a need for sustainable irrigation water desalination—a scoping review*. *Earth*, **4**(2):223-240. <https://doi.org/10.3390/earth4020012>
- Kundzewicz Z. W. & Krysanova V. 2010. Climate change and stream water quality in the multi-factor context. *Climatic Change*, **103**(3):353–362. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9822-9>

Lima A. M. M., Oliveira L. L., Fontinhas R. L., Lima R. J. S. 2005. *Ilha do Marajó: revisão histórica, hidroclimatologia, bacias hidrográficas e propostas de gestão*. *Holos Environment*, **5**(1):65. <https://doi.org/10.14295/holos.v5i1.331>

Manorshi. 2025. *Ultrasonic sensor module JSN-SR04T-3.0*. Disponível em: <https://ikrorwxhjiilll5q.ldycdn.com/JSN-SR04T-3.0-aidnqBpoKliRljSlqnqkilqj.pdf>. Acesso em: 19/02/2025.

Mantyka-Pringle C. S., Visconti P., Di Marco M., Martin T. G., Rondinini C., Rhodes J. R. 2015. Climate change modifies risk of global biodiversity loss due to land-cover change. *Biological Conservation*, **187**:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.016>

Marengo J. A. & Hastenrath S. 1993. Case studies of extreme climatic events in the Amazon Basin. *Journal of Climate*, **6**(4):617–627. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0617:CSOECE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0617:CSOECE>2.0.CO;2)

Math R. K. M. & Dharwadkar N. V. 2018. IoT based low-cost weather station and monitoring system for precision agriculture in India. *In: 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*. Anais[...]. Palladam, p. 81–86. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2018.8653749>.

MaxBotix Inc. 2025. *XL-MaxSonar-WR datasheet*. Disponível em: <https://maxbotix.com/pages/xl-maxsonar-wr-datasheet>. Acesso em: mar 2025.

Maxim Integrated. 2019. *DS18B20 – Programmable resolution 1-Wire digital thermometer*. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>. Acesso em: 14/01/2025.

Measurement Specialties. 2017. *MS5611-01BA03 barometric pressure sensor, with stainless steel cap*. Disponível em: <https://www.amsys-sensor.com/downloads/data/MS5611-01BA03-AMSYS-datasheet.pdf>. Acesso em: 13/01/2025.

Mendes L. S. A., Pontes F. A. R., Silva S. S. C., Bucher-Maluschke J. S. N. F., Reis D. C., Silva S. D. B. 2008. Inserção ecológica no contexto de uma comunidade ribeirinha amazônica. *Revista Interamericana de Psicología/Interamerican Journal of Psychology*, **42**(1):1–10. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28442101>.

Muehe D. (ed.). 2018. *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente (MMA). 761 p. Disponível em: https://www.bivica.org/files/5975_11.%20TerraMar_Panorama%20da%20Eros%C3%A3o%20Costeira%20do%20Brasil_PDF.pdf. Acesso em: 19/12/2024.

Muehe D. & Nicolodi J. L. 2008. Geomorfologia. *In: Zamboni A. & Nicolodi J. L (ed.). Macrod diagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*. Brasília, DF Ministério do Meio Ambiente (MMA). p. 23-57.

Neokye E. O., Wang X., Thakur K. K., Quijon P., Nawaz R. A., Basheer S. 2024. *Climate change impacts on oyster aquaculture - Part I: identification of key factors*. *Environmental Research*, **251**:118561. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118561>

Oliveira Ângela Maria Santos. *Subsídios à gestão da Reserva Extrativista Marinha de Soure-Marajó-Pará: uma análise dos problemas e conflitos socioambientais*. Orientador: Menezes Maria de Nazaré Ângelo. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia, Núcleo de Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012. 126 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/9777>. Acesso em: 14/02/2025

Owuor M., Santos T. M. T., Otieno P., Mazzuco A. C. A., Iheaturu C., Bernardino A. F. 2024. Flow of mangrove ecosystem services to coastal communities in the Brazilian Amazon. *Frontiers in Environmental Science*, **12**. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1329006>

Pantoja R. C. P., Costa G. S., Maciel H. L., Silva E. A. 2024. Modo de vida tradicional dos povos amazônicos, lutas socioambientais e reforma agrária na Gleba Joana Peres, Portel — PA. *Amazônica - Revista de Antropologia*, **16**(1):63-90. <https://doi.org/10.18542/amazonica.v16i1.14706>

Parmar G., Lakhani S., Chattopadhyay M. K. 2017. An IoT based low-cost air pollution monitoring system. *In: 2017 International Conference on Recent Innovations in Signal Processing and Embedded Systems (RISE)*. Anais[...]. Bhopal, p. 524–528. doi: 10.1109/RISE.2017.8378212

Qin Y., Yang X., Wu B., Sun Z., Shi X. 2013. High resolution temperature measurement technique for measuring marine heat flow. *Science China Technological Sciences*, **56**(7):1773–1778. <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5239-9>

Rao A. S., Marshall S., Gubbi J., Palaniswami M., Sinnott R., Pettigrov V. 2013. Design of low-cost autonomous water quality monitoring system. *In: 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*. Anais [...]. Mysore, p. 14–19. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2013.6637139>

Rebello-Mochel F., Ponzoni F. J. 2007. *Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **79**(4):683–692. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652007000400009>

Receita Federal. 2024. *Quanto vou pagar de impostos?* Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/aduana-e-comercio-exterior/manuais/remessas-postal-e-expressa/preciso-pagar-impostos-nas-compras-internacionais/quanto-pagarei-de-imposto>. Acesso em: 23/02/2025

Ryabinin V., Barbière J., Haugan P., Kullenberg G., Smith N., McLean C., Troisi A., Fischer A., Aricò S., Aarup T., Pissierssens P., Visbeck M., Enevoldsen H. O., Rigaud J. 2019. The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development. *Frontiers in Marine Science*, **6**. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00470>

Sales I. C., Lehfeld L. S., Silva J. B. 2023. *Política pública ambiental e a necessidade do monitoramento: uma análise a partir do programa Município Verdeazul*. *Revista Direitos Sociais e Políticas Públicas (UNIFAFIBE)*, **11**(1). <https://doi.org/10.25245/rdspp.v11i1.1175>

Sensirion. 2024. *Datasheet – SHT4xA 4th generation, high-accuracy, functional safety compliant automotive-grade relative humidity and temperature sensor*. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/682/HT_DS_Datasheet_SHT4xA_1-3539398.pdf. Acesso em: 2025.

Singh D., Tripathi G., Jara A. J. 2014. *A survey of Internet-of-Things: future vision, architecture, challenges and services*. In: 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IOT). Anais [...]. Seoul, p. 287–292. doi: 10.1109/WF-IoT.2014.6803174

Siwar C., Ahmed F., Begum R. A. 2013. *Climate change, agriculture and food security issues: Malaysian perspective*. *Journal of Food Agriculture & Environment*, **11**(2):1118–1123.

Souza C. A., Duarte L. F. A., João M. C. A., Pinheiro M. A. A. 2017. *Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica*. In: Pinheiro M. A. A. & Talamoni A. C. (ed.). *Educação ambiental sobre manguezais*. São Vicente, Campus do Litoral Paulista - Instituto de Biociências. p. 16-55. Disponível em: <https://www.clp.unesp.br/Home/publicacoes/educacao-ambiental-sobre-manguezais.pdf>. Acesso em: 25/02/2025.

Souza-Filho P. W. M. 2005. *Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos*. *Revista Brasileira de Geofísica*, **23**:427–435. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400006>

Sparkfun. 2025. *Ultrasonic ranging module HC-SR04*. Disponível em: https://cdn.sparkfun.com/assets/b/3/0/b/a/DGCH-RED_datasheet.pdf. Acesso em: 21/01/2025

Stewart R. H. 2008. *Introduction to physical oceanography*. Texas, Department of Oceanography, 345 p. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1969.1/160216>. Acesso em: 22/03/2025.

Tanenbaum A. S. & Todd A. 2013. *Organização estruturada de computadores*. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 605 p.

Tarara J. M. & Hoheisel G. A. 2007. Low-cost shielding to minimize radiation errors of temperature sensors in the field. *HortScience*, **42**(6):1372–1379. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.6.1372>

Teixeira G. 2019. *Projeto ESP32 display e sensor DHT22 medindo temperatura e umidade*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-esp32-com-display-oled-e-sensor-am2302-dht22-medindo-temperatura-e-umidade>. Acesso em: mar 2025

Texas Instruments. 2016. *HDC1080 low power, high accuracy digital humidity sensor with temperature sensor*. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1743348703602&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.it%252F. Acesso em: 16/03/2025

Thomsen A. 2015. *Temperatura debaixo d'água com sensor de temperatura DS18B20*. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/sensor-de-temperatura-ds18b20-arduino>. Acesso em:

Thomson R. E. & Emery W. J. (ed.). 2014. *Data analysis methods in physical oceanography*. Oxford, Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123877826/data-analysis-methods-in-physical-oceanography#book-info>. Acesso em: 19/03/2025

Tófoli C. F., Lehmann D., Lemos L., Pollyana F., Bernardes V. C. D., Quelu H., Pellin A. 2022. *Monitoramento participativo da biodiversidade: experiências, resultados e aprendizados para conservação da biodiversidade na Amazônia*. Nazaré Paulista, IPÊ - Instituto de Pesquisas Ecológicas. 164 p. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/monitoramento/conteudo/livros/Tofolieta2023MPBST1experienciasresultadoseaprendizadosparaconservadabiodiversidadeAmazonica_compressed1.pdf. Acesso em: 18/01/2025

Tófoli C. F., Lemos P. F., Chiaravalloti R., Prado F. 2019. *Monitoramento participativo da biodiversidade: aprendizados em evolução*. Nazaré Paulista, IPÊ - Instituto de Pesquisas Ecológicas. 166p. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-diversas/monitoramento_participativo_biodiversidade_2_edicao_2013_2017.pdf. Acesso em: 19/03/2025

Tomaschewski Netto G. & Arigony-Neto J. 2019. Open-source automatic weather station and electronic ablation station for measuring the impacts of climate change on glaciers. *HardwareX*, 5:e00053. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00053>

Torres A., El-Robrini M., Costa W. 2018. Panorama da erosão costeira — Amapá. In: Ministério do Meio Ambiente. *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília, DF, p. 19-63. Disponível em: https://www.bivica.org/files/5975_11.%20TerraMar_Panorama%20da%20Eros%C3%A3o%20Costeira%20do%20Brasil_PDF.pdf. Acesso em: 02/04/2025.

Universidade Federal do Pará (Ufpa). 2017. *Estação meteorológica da UFPA mede o clima no Campus Universitário em tempo real*. Disponível em: <https://portal.ufpa.br/index.php/ultimas-noticias/523-estacao-meteorologica-da-ufpamede-o-clima-no-campus-universitariuo-em-tempo-real>. Acesso em: 22/01/2025

UN Environment Programme (UNEP). 2020. *Why low-cost sensors? Opportunities and challenges*. Disponível em: <https://www.unep.org/explore-topics/air/what-we-do/monitoring-air-quality/why-low-cost-sensors-opportunities-and>. Acesso em: 27/02/2025

United States Geological Survey (USGS). 2019. *Seawater intrusion*. Disponível em: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/saltwater-intrusion>. Acesso em: 14/11/2024

Usinainfo. 2025. *Sensor de ângulo magnético potenciômetro AS5600 alta precisão efeito hall*. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-efeito-hall-arduino/sensor-de-angulo-magnetico-potenciometro-as5600-alta-precisao-efeito-hall-8755.html>. Acesso em: 15/03/2025

Walsh K. J. E., McInnes K. L., McBride J. L. 2012. Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific — a regional assessment. *Global and Planetary Change*, **80–81**:149–164. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.10.006>

Wang W., Yang M., Yu L., Liu D. 2020. Design of PT100 high-precision temperature measurement systems based on third-order model. *Ferroelectrics*, **563**(1):118–127. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1760616>

Wang Y., Rajib S. M. S. M., Collins C., Grieve B. 2018. Low-cost turbidity sensor for low-power wireless monitoring of fresh-water courses. *IEEE Sensors Journal*, **18**(11):4689–4696. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2826778>