



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE – CCBS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA – DEOLI
CURSO DE OCEANOGRAFIA

BRUNO BARBOSA SILVA

**VARIAÇÃO SAZONAL DA INTRUSÃO DE AEROSSÓIS MARINHOS EM SÃO
LUÍS - MARANHÃO**

SÃO LUÍS/MA

2025

BRUNO BARBOSA SILVA

**VARIAÇÃO SAZONAL DA INTRUSÃO DE AEROSSÓIS MARINHOS EM SÃO
LUÍS - MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para obtenção
do grau de bacharelado em Oceanografia.

Orientador: Dr^a Cláudia Klose Parise

Co-orientador: Dr. Heitor Perotto

SÃO LUÍS/MA

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a). Diretoria
Integrada de Bibliotecas/UFMA

Barbosa Silva, Bruno.

VARIAÇÃO SAZONAL DA INTRUSÃO DE AEROSSÓIS MARINHOS EM
SÃO LUÍS - MARANHÃO / Bruno Barbosa Silva. - 2026.
70 f.

Coorientador(a) 1: Heitor Perotto.

Orientador(a): Cláudia Klose Parise.

Monografia (Graduação) - Curso de Oceanografia,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís,
2026.

1. Aerossóis Marinhos. 2. Íons Cloreto. 3. Regime de
Ventos. 4. Ambiente Costeiro. 5. Reanálise Era5. I.
Klose Parise, Cláudia. II. Perotto, Heitor. III. Título.

VARIAÇÃO SAZONAL DA INTRUSÃO DE AEROSSÓIS MARINHOS EM SÃO LUÍS - MARANHÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Oceanografia.

APROVADO EM: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Klose Parise (Orientadora)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Prof^ª. Dr^ª. Samara Aranha Eschrique
Universidade Federal do Maranhão

Prof^ª. Dr^ª. Paula Cilene Alves da Silveira
Universidade Federal do Maranhão

Prof^º. Dr^º. James Werllen de Jesus Azevedo
Universidade Federal do Maranhão

Dedico a todos os oceanógrafos que se formaram e que se formarão no curso de oceanografia na Universidade Federal do Maranhão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por colocar as pessoas certas no meu caminho.

Agradeço aos meus familiares, principalmente a minha esposa Keliane, pois sem o apoio em nosso lar, me permitindo seguir o meu sonho, esse estudo não seria possível.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Cláudia Klose Parise e ao meu co-orientador Dr. Heitor Perotto, que estiveram do meu lado nos momentos decisivos conduzindo e explicando tudo o que era necessário para tornar esse estudo algo mais relevante.

In memoriam - Ao oceanógrafo Jacques Yves Cousteau, por ter despertado em minha infância o amor pela oceanografia.

Agradeço a todos os responsáveis dos locais, que permitiram instalar os aparatos de vela úmida, em pontos estratégicos no município de São Luís - MA.

Agradeço à instituição UFMA, a todos no setor de marcenaria e aos demais colaboradores da prefeitura do Campus, por permitirem a construção dos suportes para a instalação das velas úmidas.

Ao LAPQAP- Laboratório de Análises e Pesquisas em Química Analítica de Petróleo e Biocombustíveis, por ter fornecido os reagentes - Nitrato de mercúrio, ácido Nítrico e o glicerol, para a análise química.

À coordenação do curso de química da UFMA, pelo reagente - azul de bromofenol.

Agradeço a todos do laboratório LABCICLOS, devido a prontidão e a expertise técnica na análise em laboratório na determinação do teor de Cl⁻. Principalmente a técnica de laboratório Suzieth Monteiro Melo Brito, que realizou a análise química, explicando o procedimento e orientando a mim e aos estagiários do LABCICLOS.

Agradeço a todos do LACLIMA (Juliana, Tayssa, Caco, Laía, Hugo, Sebastian, Daniele Oliveira, Bárbara, Jamille, Rivaldo, Andrey, Daniel, Thainá, Rafa, Bruna, Michelly, Leon), pela força e o apoio emocional para seguir em frente.

“O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria”.

Isaac Asimov.

RESUMO

Os aerossóis marinhos são partículas geradas na interface oceano-atmosfera que desempenham papel relevante no sistema climático, ao influenciarem o balanço radiativo, a formação de nuvens e a qualidade do ar, especialmente em regiões costeiras. Nesse contexto, este estudo teve por objetivo avaliar o alcance dos Cl^- , provenientes do spray marinho, na orla de São Luís - Maranhão, bem como identificar os principais fatores meteorológicos e topográficos que condicionam sua penetração ilha adentro. A área de estudo compreendeu aproximadamente 28,23 km², com 8 pontos de coleta de Cl^- distribuídos a diferentes distâncias da linha da costa e cotas altimétricas. A determinação do teor de cloretos seguiu a Norma ABNT NBR 6211:2001, por meio do método da vela úmida com posterior titulação mercurimétrica, expressando os resultados em mg/(m².d). Foram realizados dois experimentos de campo em 2024, com exposição de 31 dias cada, um entre 02 de julho e 02 de agosto correspondente ao período de transição entre a estação chuvosa e o regime de ventos, e outro em de 02 de outubro e 02 de novembro, período de intensificação dos ventos alísios. Dados de reanálise ERA5 foram utilizados para caracterizar o regime de ventos em superfície, incluindo a climatologia, séries temporais, anomalias de velocidade do vento. Os resultados indicam que a deposição de Cl^- é fortemente influenciada pela intensidade, persistência e direção dos ventos, associadas à topografia local e a presença de barreiras físicas naturais e artificiais. Observou-se maior intrusão da maresia no período de Out/Nov, sob anomalias positivas de velocidade do vento, enquanto no período de Jun/Jul observou-se correlações mais fracas entre a distância da costa e teor de cloretos. Este estudo conclui que a combinação entre o regime de ventos em superfície e as características geomorfológicas locais controla a distribuição espacial dos Cl^- na orla de São Luís, evidenciando maior deposição nas áreas mais expostas aos ventos dominantes e redução progressiva município adentro. Como trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do período de monitoramento, a inclusão de novos pontos de coleta e em diferentes alturas em relação ao nível do mar, bem como a integração com medições meteorológicas *in situ* e a avaliação dos impactos da deposição sobre materiais, infraestrutura urbana e ecossistemas costeiros.

Palavras-chave: Aerossóis marinhos; Íons Cloreto; Regime de ventos; ambiente costeiro; Reanálise ERA5.

ABSTRACT

Marine aerosols generated at the ocean–atmosphere interface play a relevant role in the climate system by influencing radiative balance, cloud formation, and air quality, particularly in coastal regions. In this context, this study aimed to evaluate the inland penetration of chloride ions derived from marine spray along the coast of São Luís, Maranhão, Brazil, and to identify the main meteorological and topographic factors controlling their deposition. The study area covered approximately 28.23 km², with eight chloride sampling points distributed at different distances from the coastline and elevation levels. Chloride deposition was determined following ABNT NBR 6211:2001 using the wet candle method, with subsequent mercurimetric titration, and results expressed in mg·m⁻²·day⁻¹. Two 31-day field experiments were conducted in 2024: one from July 2 to August 2, representing the transition between the rainy season and the onset of the wind regime, and another from October 2 to November 2, corresponding to the period of intensified trade winds. ERA5 reanalysis data were used to characterize surface wind conditions, including long-term climatology, time series, and wind speed anomalies. The results indicate that chloride deposition is strongly influenced by wind intensity, persistence, and direction, combined with local topography and the presence of natural and artificial physical barriers. Greater sea-salt intrusion was observed during the October–November period, under positive wind speed anomalies, whereas during June–July weaker correlations were found between the distance from the coastline and chloride concentrations. This study concludes that the combination of the surface wind regime and local geomorphological characteristics controls the spatial distribution of chloride ions along the coastline of São Luís, with higher deposition in areas more exposed to the prevailing winds and a progressive decrease inland. As future work, it is recommended to extend the monitoring period, include additional sampling sites at different elevations relative to sea level, and integrate in situ meteorological measurements, as well as to assess the impacts of chloride deposition on materials, urban infrastructure, and coastal ecosystems.

Keywords: Marine aerosols. Chloride deposition. Wind regime. Coastal environment. ERA5 reanalysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1 – Esquema ilustrativo dos mecanismos de formação de gotículas a partir da ruptura de bolhas na superfície da água | 5 |
| Figura 2 – Esquema da circulação de brisa marítima (durante o dia) e continental (durante a noite) | 8 |
| Figura 3 – Área de estudo compreendendo a localização e a distribuição dos pontos de coleta dos Cl⁻s | 13 |
| Figura 4 –Registros dos aparatos de vela úmida instalados nos pontos de coleta | 15 |
| Figura 5 – Dispositivo de coleta de aerossóis marinhos e sistema de Instalação..... | 16 |
| Figura 6 – Materiais e procedimentos laboratoriais | 18 |
| Figura 7 – Etapas da titulação mercurimétrica | 19 |
| Figura 8 –Relação entre a distância da linha de costa e o teor de Cl⁻ nos períodos de julho/agosto e outubro/novembro de 2024 | 23 |
| Figura 9 – Mapa topográfico do município de São Luís, com os pontos amostrais | 24 |
| Figura 10 – Correlação entre a distância da linha de costa e o teor de Cl⁻ no período de julho/agosto de 2024 | 25 |
| Figura 11 – Correlação entre a distância da linha de costa e o teor de Cl⁻ no período de outubro/novembro de 2024 | 26 |
| Figura 12 – Correlação entre a cota de elevação e o teor de Cl⁻ no período de julho/agosto de 2024 | 27 |
| Figura 13 – Correlação entre a cota de elevação e o teor de Cl⁻ no período de outubro/novembro de 2024..... | 27 |
| Figura 14 – Climatologia mensal da velocidade do vento a 10 m de altura (1980–2024) obtida da reanálise ERA5..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 15 – Série temporal da velocidade do vento a 10 m de altura (1980–2024) obtida da reanálise ERA5 | 30 |
| Figura 16 – Evolução da velocidade do vento a 10 m de altura ao longo do ano de 2024 | 31 |
| Figura 17 – Anomalia diária da velocidade do vento em julho de 2024 em relação à climatologia 1980–2024 | 32 |
| Figura 18 – Anomalia diária da velocidade do vento em outubro de 2024 em relação à climatologia 1980–2024 | 33 |
| Figura 19 – Diagramas vetoriais (stick plot) do vento a 10 m de altura nos períodos de julho e outubro de 2024 | 34 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 – Concentração e proporção geral dos íons em mares e oceanos | 6 |
| Tabela 2 – Localização, distância da linha de costa e cota de elevação dos pontos amostrais | 12 |
| Tabela 3 – Concentração dos Cl⁻ no período jul/ago de 2024 | 21 |
| Tabela 4 – Concentração dos Cl⁻ no período out/nov de 2024 | 22 |
| Tabela 5 – Comparação dos teores de Cl⁻ com estudos realizados em regiões costeiras | 38 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASBOA – Associação de Surf e Bodyboard do Olho d'Água

CLA – Camada Limite Atmosférica

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA5 – Reanálise atmosférica do ECMWF (5ª geração)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MA – Maranhão

NBR – Norma Brasileira

UFMA – Universidade Federal do Maranhão

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

Cl⁻ – Íon cloreto

Na⁺ – Íon sódio

u – Componente zonal do vento

v – Componente meridional do vento

mg/(m².d) – Miligrama por metro quadrado por dia

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.1.2 Objetivo Geral..... | 3 |
| 1.1.3 Objetivos Específicos..... | 4 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1 Definição e Formação de Aerossóis Marinhos..... | 4 |
| 2.2 Composição Iônica da Água do Mar como Fonte de Aerossóis Marinhos..... | 5 |
| 2.3 Fluxos Turbulentos na Camada Limite Atmosférica..... | 6 |
| 2.4 Brisa Marítima e Terrestre..... | 7 |
| 2.5 Sistemas de Ventos Alísios e a Zona de Convergência Intertropical..... | 8 |
| 2.6 Estudos Semelhantes..... | 9 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 11 |
| 3.1 Área de Estudo..... | 11 |
| 3.2 Dados Químicos e Climáticos..... | 13 |
| 3.3 Experimento de Campo..... | 15 |
| 3.4 Análises..... | 19 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 21 |
| 4.1 Comparação com Outros Estudos do Brasil..... | 35 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 39 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 40 |
| APÊNDICE A - Dados brutos de titulação (jul/ago 2024)..... | 46 |
| APÊNDICE B - Dados brutos de titulação (out/nov 2024)..... | 47 |
| APÊNDICE C - Tabelas completas de cálculo de teor de cloretos..... | 48 |
| (Jul/Ago) 2024 | 48 |
| APÊNDICE E - Modelo de aviso informativo fixado ao suporte..... | 51 |
| ANEXO - Norma Técnica..... | 52 |

1 INTRODUÇÃO

Aerossóis marinhos constituem uma fração significativa dos aerossóis atmosféricos e são gerados principalmente pelo rebentamento de bolhas de interface ar-mar, que produz spray e partículas salinas ricas em NaCl (Alves, 2014; Wurl et al., 2017; O'Dowd; De Leeuw, 2007; Pöschl, 2005). Em zonas costeiras, esses aerossóis influenciam a química atmosférica regional e a formação de nuvens e tem implicações práticas, como a corrosão acelerada de estruturas metálicas e a deposição salina em superfícies urbanas (Revie & Uhlig, 2008; Alcântara et al., 2014). A penetração continental do spray marinho é fortemente dependente de fatores meteorológicos (velocidade e direção do vento, precipitação, umidade), bem como de variáveis locais (distância da linha de costa, altitude, barreiras naturais e artificiais) (O'Dowd et al., 2010; Caffrey et al., 2006; Macacchero et al., 2017).

O rompimento de bolhas é o principal processo para liberação de gotículas marinhas para a atmosfera. À medida que as ondas quebram, bolhas aprisionadas na água sobem à superfície e se rompem, liberando pequenas gotículas que após evaporação parcial, originam partículas de aerossol. Além disso, a atividade biológica presentes na microcamada superficial oceânica (MCSO) e na coluna d'água pode ser transferida para esses aerossóis, contribuindo para a formação de bioaerossóis e resultando em partículas que refletem a composição dos aerossóis marinhos, sendo rica em sais marinhos como: cloreto de sódio, matéria orgânica e, em alguns casos, até microrganismos, como bactérias, vírus, fragmentos de zoo e fitoplânctons (Veron, 2015).

A MCSO é a camada mais superficial do oceano, com apenas algumas centenas de micrômetros de espessura. Embora seja extremamente fina, ela exerce um papel importante para os ciclos biogeoquímicos globais e para as trocas entre o oceano e a atmosfera. Nessa zona reativa ocorrem intensas interações físicas, químicas e biológicas, incluindo a acumulação de matéria orgânica dissolvida e particulada, surfactantes, compostos gelatinosos e uma microbiota abundante composta por bactérias, vírus e fragmentos de fitoplâncton. A MCSO desempenha papel central na composição química do spray marinho, uma vez que compostos orgânicos e microrganismos presentes nessa camada são transferidos para a atmosfera durante o processo de estouro de bolhas (Wang et al., 2017; Cunliffe; Wurl, 2017).

Por atuarem como vetores de transporte de uma variedade de compostos da MCSO para a atmosfera, influenciando a química atmosférica em escala regional e global. Esses compostos incluem matéria orgânica (como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e bifenilos policlorados), halogênios (como iodo, carbonos), que podem afetar tanto o ciclo atmosférico de nutrientes quanto a química de nuvens. Adicionalmente, as propriedades físico-químicas dos aerossóis, como a absorção de radiação e capacidade de atuar como núcleo de condensação de nuvens, estão diretamente relacionadas à sua composição química, frequentemente modulada pelo material originário da MCSO (Veron, 2015). Ao atuarem como núcleos de condensação, eles afetam a precipitação e o balanço radiativo, além de participarem de reações químicas que podem impactar a saúde humana por meio de aerossóis atmosféricos, especialmente na fração de material particulado fino ($PM_{2.5}$), representam um importante fator de risco à saúde humana, uma vez que podem ser inalados profundamente no trato respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e induzindo processos inflamatórios locais e sistêmicos. Os impactos associados incluem o agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, redução da função pulmonar e aumento da mortalidade prematura, sendo esses efeitos fortemente modulados pela composição químico-física das partículas, incluindo sua origem marinha, orgânica e halogenada (IPCC, 2021).

Em ambientes marinhos, a deposição de aerossóis ricos em cloretos é um fator determinante para processos de corrosão atmosférica, acelerando a degradação de metais expostos (Li; Li; Tan, 2005; Alcántara et al., 2017). Os Cl^- em particular possuem a capacidade de romper a camada passivadora que se forma naturalmente em alguns metais (como o aço inoxidável e o alumínio), expondo a superfície metálica e acelerando o processo de deterioração. O ciclo constante de umedecimento (por névoa salina, orvalho) e secagem em ambientes litorâneos intensifica a agressividade do processo e como a concentração de cloretos é maior próximo ao litoral e decresce com a distância em direção ao interior continental, frequentemente apresentando comportamento exponencial, o que implica uma redução gradual da severidade da corrosão atmosférica em áreas mais afastadas do litoral (Alves 2014; Alcántara et al., 2017).

Durante a secagem, os sais se concentram na superfície, e durante o umedecimento, eles se dissolvem, formando um eletrólito agressivo. Por isso, estruturas localizadas em áreas costeiras são as mais afetadas pela corrosão atmosférica induzida

por sais marinhos, o que exige o uso de materiais mais resistentes ou de sistemas de proteção anticorrosiva mais robustos (como revestimentos protetores e galvanização).

Cavalcanti et al. (2009) investigou a tendência das concentrações de Cl^- diminuírem gradualmente à medida que se afastam da linha de costa com base na suposição de que os ventos alísios, majoritariamente do nordeste, facilitam a entrada de aerossóis marinhos no continente.

A ação combinada das atividades químicas, físicas e biológicas da água do mar influencia no grau de corrosividade e sua agressividade junto às construções e equipamentos que utilizam materiais metálicos, completa ou parcialmente. A corrosão pode ser definida como a deterioração de um metal devido à ação do meio ambiente, o que faz com que esse metal perca sua massa e/ou as suas qualidades mecânicas essenciais, tornando-se inadequado para o uso prático conforme discutido por Matlakhov (2021). A corrosão é um processo multifatorial, influenciado por umidade, salinidade, temperatura e padrões de vento, conforme abordado em materiais de orientação técnica da Associação Brasileira de Corrosão (2025). É importante a realização de estudos sobre a penetrabilidade dos aerossóis marinhos nas regiões litorâneas, como o município de São Luís - MA, onde a proximidade com o oceano intensifica os mecanismos de corrosão atmosférica.

1.2 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é analisar o alcance e a penetração do spray marinho no município de São Luís, por meio da determinação da distância, a partir da linha de costa, em que a concentração de Cl^- na atmosfera se mantém mais relevante, e a partir de qual ponto essa concentração passa a ser menos significativa.

1.1.3 Objetivos Específicos

- Verificar a efetividade do aparato de vela úmida descrito na norma NBR 6211-2001 para a obtenção de Cl^- na atmosfera oriundos do spray marinho no município de São Luís.
- Comparar os resultados obtidos neste experimento com outros experimentos semelhantes, realizados neste município e em outros estados brasileiros.
- Avaliar a variação espacial e sazonal da concentração de Cl^- na atmosfera ao longo das diferentes distâncias a partir da linha de costa, considerando os períodos secos e chuvosos no município de São Luís.
- Analisar a influência dos ventos alísios e dos padrões anômalos de transporte eólico no alcance e na penetração do spray marinho, de forma a embasar a aplicação de modelos de dispersão de poluentes na baixa troposfera de São Luís.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definição e Formação de Aerossóis Marinhos

Aerossóis marinhos são partículas líquidas suspensas no ar originadas predominantemente da interação entre a atmosfera e a superfície do oceano (Pöschl, 2005). São compostos majoritariamente por sais marinhos como Na^+ e Cl^- (Millero, 2006; O'Dowd; De Leeuw, 2007) e apresentam material orgânico dissolvido ou particulado, conforme descrito por Pöschl (2005), como mostra a Tabela 1. Os aerossóis marinhos representam a maior fonte natural de partículas primárias no planeta, desempenhando papel central na química atmosférica, no balanço radiativo da terra e nos processos de corrosão em regiões costeiras (Pöschl, 2005; O'Dowd et al., 2010).

A produção de aerossóis marinhos resulta sobretudo da quebra de ondas e do estouro de bolhas de ar formadas na superfície do oceano, que emergem pela coluna d'água e se rompem na interface ar-mar, liberando gotículas ricas em sais e matéria orgânica para a atmosfera. Esses mecanismos controlam o tamanho e a composição das partículas emitidas (Veron, 2015; O'Dowd, 2004).

No desenho esquemático (Figura 1), as gotas de filme (à esquerda) são produzidas pela ruptura do filme superficial de bolhas grandes, onde compostos orgânicos ativos se acumulam, enquanto que as gotas de jato (à direita) resultam da ejeção vertical do jato formado após o colapso da cavidade deixada por bolhas ultra finas.

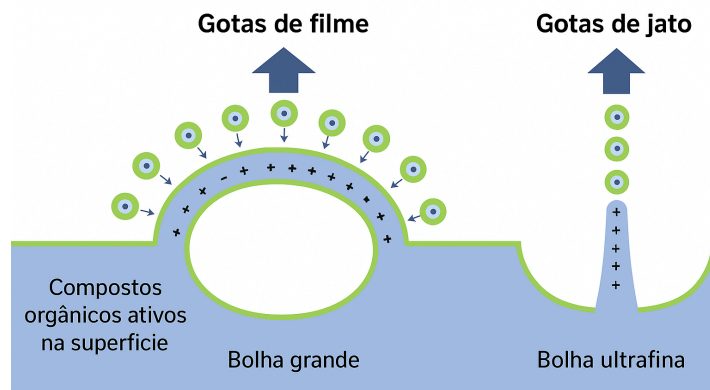


Figura 1. Esquema ilustrativo dos mecanismos de formação de gotículas a partir da ruptura de bolhas na superfície da água. Fonte: Modificado com uso de IA a partir de Wang et al. (2017).

2.2 Composição Iônica da Água do Mar como Fonte de Aerossóis Marinhos

A salinidade dos oceanos é determinada pela concentração total de sais dissolvidos, sendo relativamente constante em escala global, com valor médio em torno de 35 g kg^{-1} . Os principais íons presentes na água do mar incluem cloreto (Cl^-), sódio (Na^+), sulfato (SO_4^{2-}), magnésio (Mg^{2+}), cálcio (Ca^{2+}), e potássio (K^+), cujas proporções relativas permanecem praticamente invariáveis (Tabela 1), conforme descrito por Millero (2006).

No entanto, nas regiões costeiras, a salinidade pode apresentar variações significativas em função de fatores locais, como descarga fluvial, precipitação, evaporação e dinâmica estuarina. Na costa maranhense, estudos indicam valores de salinidade variando entre $25,3$ e $35,7 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto o Atlântico Sul apresenta valores médios de $35,2 \text{ g kg}^{-1}$. Essas variações ocorrem principalmente em resposta à sazonalidade climática, com redução da salinidade durante o período chuvoso devido à influência de rios da região (Ferreira do Nascimento et al., 2020).

Esses sais dissolvidos constituem a principal fonte dos íons presentes nos aerossóis marinhos, uma vez que o processo de quebra das ondas e estouro das bolhas na

interface ar-mar promove a transferência direta da composição química da água do oceano para a atmosfera, permitindo seu transporte pelos ventos em direção ao continente.

Tabela 1. Concentração e proporção geral dos íons em mares e oceanos. Fonte: Retirado de Millero (2006).

| Íons | Símbolo | Concentração (g/Kg) | Proporção (%) |
|--------------|-------------------------------|---------------------|---------------|
| Cloreto | Cl ⁻ | 19,3529 | 55,056 |
| Sódio | Na ⁺ | 10,7838 | 30,678 |
| Sulfato | SO ₄ ²⁻ | 2,7124 | 7,716 |
| Magnésio | Mg ²⁺ | 1,2837 | 3,652 |
| Cálcio | Ca ²⁺ | 0,4121 | 1,172 |
| Potássio | K ⁺ | 0,3991 | 1,135 |
| Bicarbonato | HCO ₃ ⁻ | 0,107 | 0,304 |
| Brometo | Br ⁻ | 0,0672 | 0,191 |
| Carbonato | CO ₃ ²⁻ | 0,0161 | 0,046 |
| Estrôncio | Sr ²⁺ | 0,0079 | 0,022 |
| Borato | BO ₃ ³⁻ | 0,0079 | 0,022 |
| Fluoreto | F ⁻ | 0,0013 | 0,004 |
| Total | - | 35,1514 | 99,998 |

2.3 Fluxos Turbulentos na Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica (**CLA**) corresponde à porção mais baixa da troposfera (Stull, 1988; Garratt, 1992), que responde diretamente em escala de minutos a poucas horas, às forçantes impostas pela superfície terrestre, como aquecimento, resfriamento, rugosidade e umidade. Sua espessura varia entre algumas centenas de metros até aproximadamente 2 km, dependendo das condições sinóticas e térmicas da atmosfera (Stull, 1988; Garratt, 1992).

Nessa camada ocorrem os principais processos de transferência de calor, massa e poluentes, sendo portanto, o principal meio pelo qual os aerossóis marinhos são

transportados da interface oceano-atmosfera para o continente (Arya, 2001; Wallace; Hobbs, 2006), especialmente em regiões costeiras como São Luís.

Em áreas urbanas, como neste estudo, a rugosidade da superfície é elevada devido à presença de edificações, árvores e outros obstáculos, intensificando a turbulência mecânica e promovendo a maior mistura vertical. Esse efeito altera diretamente o transporte e a deposição dos aerossóis marinhos, modificando os padrões espaciais observados de Cl^- (Garratt, 1992; Stull, 1988).

Na porção inferior da CLA, o vento sofre forte influência do atrito com a superfície, resultando em baixas velocidades próximas ao solo e aumento progressivo com a altura. Esse comportamento gera um perfil vertical de vento aproximadamente logarítmico, descrito por Kaimal; Finnigan, (1994) e Arya (2001):

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

Onde:

$U(z)$ é a velocidade do vento na altura z ;

u^* é a velocidade de fricção;

κ é a constante de von Kármán ($\approx 0,4$) e;

z_0 representa a rugosidade aerodinâmica da superfície.

2.4 Brisa Marítima e Terrestre

As brisas marítima e terrestre são circulações atmosféricas locais, geradas pelo contraste térmico entre o continente e o oceano, desempenhando papel importante na dinâmica da CLA em regiões costeiras (Stull, 1998). Durante o período diurno, o aquecimento da superfície do continente mais rápido em relação ao oceano provoca um gradiente de pressão, induzindo o escoamento do ar do mar em direção ao continente, característica da brisa marítima (Miller et al., 2003). No período noturno, ocorre o inverso, o continente resfria-se mais rápido que o oceano, estabelecendo um gradiente de pressão que favorece o escoamento do ar da terra em direção ao mar, conhecido como brisa terrestre ou terral. Essas circulações apresentam forte variabilidade diurna e sazonal, sendo moduladas pela topografia, pela rugosidade da superfície e pelas condições sinóticas predominantes (Wallace; Hobbs, 2006; Arya, 2011).



Figura 2. Esquema da circulação de brisa marítima (durante o dia) e continental (durante a noite). Fonte: Adaptado com uso de IA de Arya (2001) e Wallace e Hobbs (2006).

A brisa marítima exerce uma influência direta no transporte de aerossóis marinhos, favorecendo a penetração de Cl^- no continente, durante o período diurno. Esse processo é relevante para os estudos da penetração de cloretos e corrosão atmosférica, uma vez que intensifica o fluxo de aerossóis do ambiente oceânico para as regiões costeiras e o interior do continente (O'Dowd; De Leeuw, 2007; Veron, 2015). Assim, a atuação das Brisas marítimas e terrestres constitui um fator essencial para a compreensão da variabilidade espacial e temporal da deposição de aerossóis marinhos em regiões litorâneas, como o município de São Luís - MA.

2.5 Sistemas de Ventos Alísios e a Zona de Convergência Intertropical

A circulação atmosférica global é o motor da formação dos ventos alísios e da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas essenciais para o regime de precipitação e ventos nas regiões tropicais, com influência direta no litoral maranhense (Cavalcanti *et al.*, 2009). Os ventos alísios são fluxos de ar constantes e úmidos que sopram de leste para oeste em baixos níveis da troposfera tropical. Eles se originam nas Altas Pressões Subtropicais (zona de subsidência e divergência de ar) e fluem em direção à Baixa Pressão Equatorial (zona de ascensão e convergência de ar).

No hemisfério Sul, os alísios sopram predominantemente de sudeste, carregando umidade oceânica em direção ao continente. Esse fluxo constante regula a nebulosidade,

a umidade relativa, o transporte de vapor d'água e a formação de sistemas convectivos tropicais.

O sistema de ventos alísios é descrito como fundamental para a geração e propagação de ondas no Atlântico tropical, influenciando diretamente o regime oceânico adjacente ao Maranhão. Destacando que, no Atlântico Equatorial, a circulação atmosférica é modulada pelos ventos alísios, que atuam como força motriz para a dinâmica de ondas e para a formação de feições oceanográficas características da região (Reis, 2021).

A ZCIT corresponde à faixa de intenso aquecimento e convergência de ventos alísios dos dois hemisférios, caracterizada por forte nebulosidade, intenso desenvolvimento vertical de nuvens e elevados índices de precipitação. Trata-se do principal sistema meteorológico responsável pelo regime de chuvas no extremo norte do Brasil e sua posição varia sazonalmente em resposta ao deslocamento do máximo de aquecimento solar (Cavalcanti *et al.*, 2009).

2.6 Estudos Semelhantes

Diversos estudos têm investigado a influência da poluição atmosférica marinha sobre o uso do método proposto neste trabalho, ajudando a corroborar com os dados obtidos, mesmo em outras localidades.

Maccachero e Tavares (2017) realizaram um estudo sobre a penetrabilidade do spray marinho no bairro da Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, com o objetivo de identificar o distanciamento máximo da costa onde as concentrações de cloreto ainda são significativas. A pesquisa utilizou o método de vela úmida, conforme a ABNT NBR 6211:2001, instalando nove pontos de coleta em um transecto perpendicular à linha de costa ao longo de um período de exposição de 34 dias, onde os principais resultados foram a relação com a distância do oceano inversamente proporcional a deposição de Cl^- , constatando a viabilidade do método de vela úmida.

Portella (2013) avaliou a taxa de concentração de cloreto na praia do Futuro, em Fortaleza (CE), utilizando o método da vela úmida. Os resultados evidenciam valores elevados de concentração de Cl^- , fortemente associados à proximidade do oceano e à ação dos ventos alísios, caracterizando o ambiente como altamente agressivo à corrosão.

Barbosa (2024) analisou a concentração de cloretos na cidade de Cabo Frio (RJ) por meio do método da vela úmida. O estudo confirmou a elevada influência dos aerossóis marinhos, destacando variações espaciais significativas relacionadas à distância da linha de costa e às condições meteorológicas locais.

Calmon et al (2009) examinaram a concentração de cloretos em zonas de atmosferas marinhas no Sudeste brasileiro, considerando diferentes ambientes costeiros. Os autores observaram altas concentrações de Cl^- , com redução progressiva em função do afastamento da linha de costa, reforçando a importância dos aerossóis marinhos na corrosividade atmosférica.

Filho & Neves (2023) realizaram uma análise experimental da agressividade ambiental do ar atmosférico na porção norte da cidade de São Luís (MA). O estudo identificou elevada agressividade atmosférica, associada principalmente à concentração de cloretos e às condições climáticas regionais, confirmando o caráter de elevada corrosividade do ambiente costeiro local.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado na cidade de São Luís, capital do estado do Maranhão, localizado nas coordenadas aproximadas de 2° 31 '48" S, Longitude: 44° 18' 10" W, com altitude média de 4 m acima do nível do mar. O município encontra-se em uma ilha costeira, limitado ao norte pelo oceano Atlântico e apresenta o relevo predominantemente plano e suavemente ondulado. O relevo da ilha do município de São Luís é caracterizado por baixas altitudes e predomínio de superfícies suavemente onduladas (TOPOGRAPHIC MAP, 2025).

Os dados altimétricos foram obtidos a partir do modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução espacial aproximada de 30 m (Figura 3). Nela é possível observar a altitude do relevo em relação ao nível do mar, onde se encontra cada ponto amostral.

A área de estudo abrange uma área aproximada de 28,23 km², inseridos nessa área encontram-se os bairros da Ponta d' Areia, Ponta do Farol, Calhau, Quintas do Calhau, Olho d'água, Jardim Renascença, Altos do Calhau, Vinhais e Bequimão (Figura 2). Nessa área foram instalados 8 pontos de coleta de Cl⁻, cujas coordenadas, altitudes e distâncias da costa são mostradas na Tabela 2. O 1° ponto foi instalado no Champs Mall localizado no bairro Ponta d'areia, o 2° ponto no primeiro banheiro público da Avenida Litorânea, o 3° ponto na sede da Associação de Surf e Bodyboard do Olho d'água (ASBOA), o 4° ponto no Blue Tree Hotel na Avenida Avicennia, o 5° ponto na sede do CREA na Avenida dos Holandeses, o 6° ponto no Galileu Center em frente ao CEASA, o 7° ponto no Colégio Adventista na Avenida Daniel de La Touche e o 8° ponto em uma residência da Rua Dercy Batista, no bairro Bequimão (Figura 2).

Tabela 2. Localização, distância da linha de costa (m) e cota de elevação (m) dos pontos de exposição das velas úmidas (P1-P8).

| PONTOS | NOME | ENDEREÇO | COORD. | DIST. DA LINHA DE COSTA (m) | COTA (m) |
|--------|----------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|----------|
| P1 | Champs Mall | Av. Ivan Loureiro, , n°4 - Ponta D'areia | 2°29'58"S 44°18'42" W | 42 | 23 |
| P2 | Banheiro Público Litorânea | Av. Litorânea, próximo ao parquinho | 2°29'04"S 44°15'55" W | 17 | 17 |
| P3 | Asboa | Av. Ivar Saldanha n° 03, Olho D'água | 2°28'51"S 44°13'45" W | 180 | 20 |
| P4 | Hotel Blue Tree | Av. Avicenia, 1 - Calhau | 2°29'10"S 44°15'51" W | 243 | 27 |
| P5 | Crea | Av. dos Holandeses, Quadra 35 - Lote 08 - Calhau | 2°29'35"S 44°15'55" W | 944 | 34 |
| P6 | Galileu Center | Galileu Center - Av. Jerônimo de Albuquerque - Cohafuma | 2°30'17"S 44°16'00" W | 2.058 | 35 |
| P7 | Colégio Adventist a | Av. Daniel de la Touche, 51 - Maranhão Novo | 2°31'26"S 44°14'57" W | 4.831 | 32 |
| P8 | Residência a | Rua Dercy Batista, 219 - Bequimão | 2°32'06"S 44°14'37" W | 6.198 | 19 |

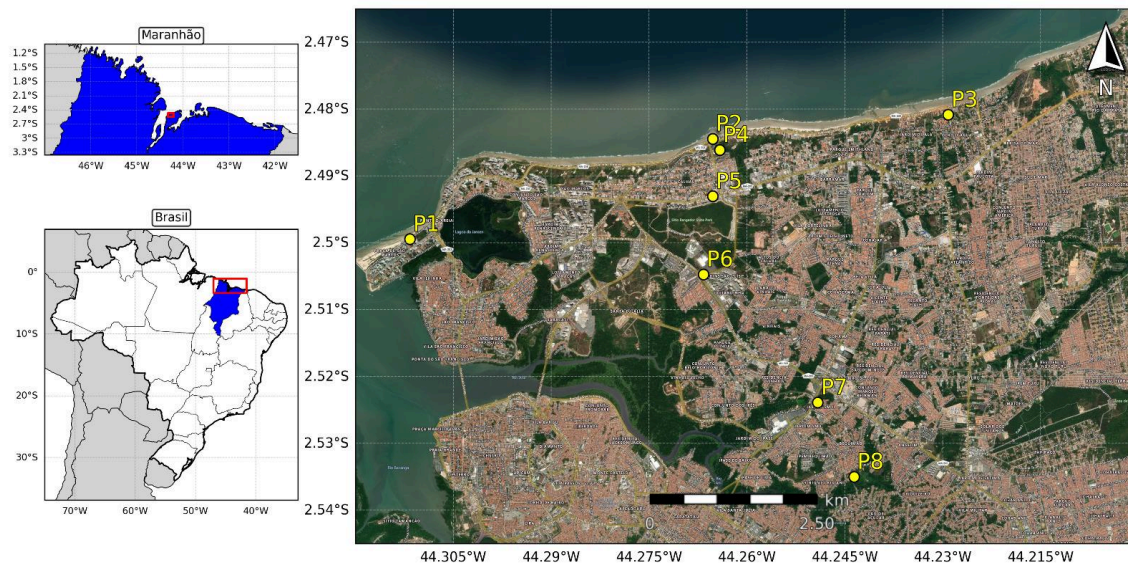


Figura 3. Área de estudo compreendendo a localização e a distribuição dos pontos de coleta dos Cl⁻s (P1 a P8, Tabela 1) ao longo da orla de São Luís (MA). O triângulo em laranja representa o ponto onde a série da reanálise ERA5 foi retirada.

3.2 Dados Químicos e Climáticos

Os dados químicos utilizados neste estudo correspondem às taxas de deposição de íons cloreto (Cl⁻), obtidas por meio do método de vela úmida, conforme a ABNT NBR 6211:2001. Os resultados foram expressos em unidades de mg/(m².d), permitindo a comparação espacial e sazonal entre os pontos de amostragem. Para cada ponto de coleta, foram calculados os valores do teor de cloretos no período, de modo a representar a variabilidade temporal da deposição de Cl⁻ (Cl⁻).

As componentes zonal (u) e meridional (v) do vento a 10 m de altura foram obtidos a partir do banco de dados da reanálise ERA5, desenvolvida pelo *European Centre Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF; Hersbach et al., 2020). Esta integra observações globais e regionais provenientes de estações meteorológicas, satélites, radiossondagens e bóias oceânicas a modelos numéricos de previsão do tempo. Essa abordagem possibilita a reconstrução contínua e consistente do estado da atmosfera, inclusive em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas. A utilização da reanálise do ERA5 neste estudo, então, justifica-se pela escassez de estações meteorológicas costeiras de São Luís, com séries temporais longas e representativas na

dinâmica atmosférica regional, sendo esse conjunto amplamente utilizado em estudos climatológicos e de transporte atmosférico de aerossóis (Kojoj et al., 2024).

Os dados possuem resolução temporal horária e espacial aproximada de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Dada a baixa resolução horizontal dos dados, foi extraída as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento a 10 m de altitude e a série temporal do vento no ponto localizado nas coordenadas de $44,25^\circ\text{W}$ e $2,5^\circ\text{S}$, representativo da área costeira de São Luís (MA), conforme indicado na Figura 2. O período analisado compreendeu o período de 1980 a 2024, permitindo a construção da climatologia mensal do vento e a análise de anomalias associadas aos períodos experimentais de julho e outubro de 2024.

Foram extraídas níveis da atmosfera para o ponto de coordenadas longitude $44,25^\circ\text{W}$ e latitude $2,5^\circ\text{S}$, representativo da área costeira do município de São Luís (MA). a partir dessas componentes, foi calculada a velocidade escalar do vento, permitindo a análise conjunta da intensidade e a direção do escoamento atmosférico.

O período analisado compreende os anos de 1980 a 2024, possibilitando a construção de uma climatologia mensal da velocidade do vento e a avaliação da variabilidade interanual e sazonal do regime de ventos da região. Adicionalmente, foram analisados de forma detalhada os meses de julho e outubro de 2024, correspondentes aos períodos experimentais de coleta de Cl⁻ pelo método da vela úmida.

As anomalias diárias de velocidade do vento para julho e outubro de 2024 foram calculadas como diferença entre os valores observados nesses meses e a média climatológica mensal correspondente ao período analisado. Esse procedimento permitiu avaliar se os experimentos de campo ocorreram sob condições atmosféricas típicas ou anómalas em relação ao clima médio da região.

Para a análise da direção e persistência do vento, foram elaborados diagramas do tipo *stick plot*, baseados nas componentes u e v , possibilitando a visualização simultânea da intensidade e da direção dos ventos ao longo dos períodos de exposição das velas úmidas. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos de transporte atmosférico e dispersão de aerossóis na CLA (Stull, 1988; Garratt, 1992; Caffrey et al., 2006).

3.3 Experimento de Campo

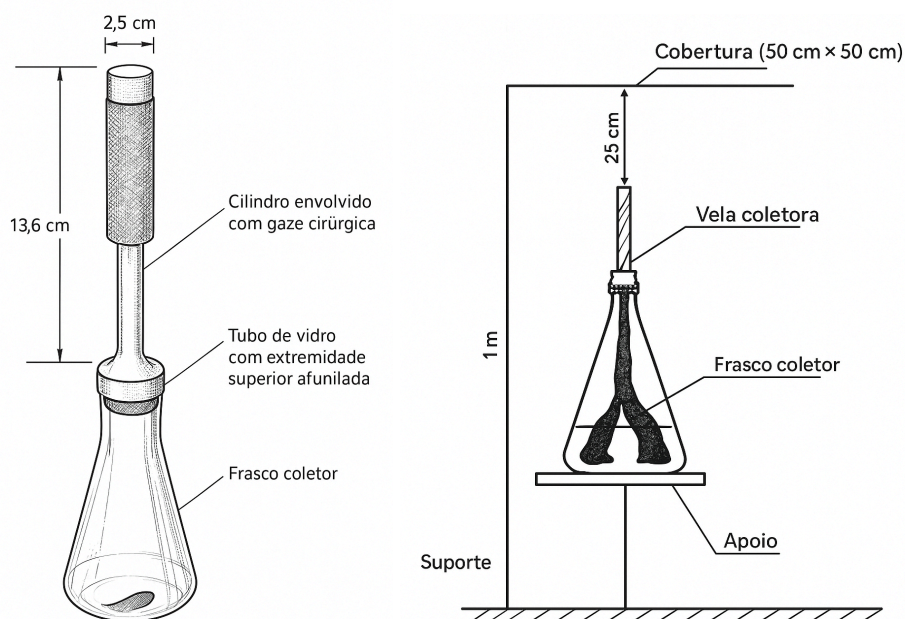
Foram realizados dois experimentos de campo para a coleta dos Cl^- no ano de 2024, com período de exposição de 31 dias cada, um de 02 de julho a 02 de agosto correspondendo à transição do período chuvoso - período de ventos) e de 02 de outubro à 02 de novembro, característico do período seco e de maior intensidade de ventos na região.



Figura 4. A-H. Registros dos aparatos de vela úmida instalados nos 8 pontos (P1-P8) de coleta de Cl^- ao longo da orla oceânica de São Luís (MA), respectivamente.

3.3.1 Método de Vela Úmida

A coleta dos aerossóis marinhos foi realizada pelo método da vela úmida (Figuras 5 a e b), conforme a ABNT NBR 6211:2001, que consiste na exposição de uma gaze impregnada com solução higroscópica para retenção de partículas atmosféricas ricas em cloretos. após o período de exposição, os Cl^- foram extraídos em solução aquosa e quantificados por titulação mercurimétrica e uma equação para a determinação do teor de cloretos (Eq. 2).



Figura

5. a) Dispositivo de coleta de aerossóis marinhos, composto por cilindro superior revestido com gaze cirúrgica para retenção de partículas, tubo de vidro com extremidade superior afunilada, suporte interno e frasco coletor na base destinado ao armazenamento do material amostrado; b) Sistema de instalação do dispositivo coletor de aerossóis marinhos em suporte fixo, composto por estrutura metálica vertical, cobertura superior (50 × 50 cm) para proteção contra precipitação, vela coletora posicionada a 20 cm da cobertura, frasco coletor contendo 200 ml de água glicerinada, apoio horizontal e altura total de instalação de aproximadamente 1 m em relação ao solo. Fonte: Modificado com uso de IA a partir da Norma ABNT NBR 6211-2001.

Adaptações pontuais foram realizadas nos suportes de instalação, visando adequação às condições de campo e à fixação em estruturas elevadas, sem comprometer o princípio físico-químico do método normalizado.

$$\text{Cloreto (mg/m}^2, \text{ d)} = \frac{2(A-B) \times M \times 35,5 \times VT}{V_a \times S \times t}, \quad (2)$$

Onde:

A é o volume gasto da solução padrão de nitrato mercúrio com a alíquota (em ml);

B é o volume gasto de solução padrão de nitrato de mercúrio com o branco (em ml);

M é a concentração de solução-padrão de nitrato de mercúrio (em mol);

VT é o volume total da amostra após a diminuição (em ml);

V_a é o volume de alíquota (em ml);

S é a área de gaze exposta (em m²);

t é o tempo de exposição (em dias).

O recipiente para o armazenamento das amostras de Cl⁻, foi o Erlenmeyer de 1000 ml, no lugar do de 800ml. Para servir de suporte aos cilindros de polietileno de 32 mm, foi utilizada a rolha de borracha, mas logo elas não serviram, pois se desmanchavam quando eram feitos os furos para a passagem das gazes. Optou-se pela produção de rolhas com um material livre de cloretos, a espuma expansiva de poliuretano (Figura 6A), injetado com um tubo prolongador de aplicação da espuma em uma fôrma no formato da rolha. A fôrma usada foi um copo plástico de 80 ml (Figura 6A). Após a solidificação da espuma, foi retirada da fôrma com auxílio de um estilete e moldada para encaixar na boca do Erlenmeyer (Figura 6A). Os furos foram feitos com um tubo de PVC de 22 mm, em seguida as hastes cilíndricas de polietileno foram envolvidas com gazes cortadas na medida especificada em norma 100 cm², as extremidades ficaram mergulhadas em uma solução de glicerol (glicerina + ácido octanóico), no Erlenmeyer. Todo o procedimento foi feito com as mãos revestidas com luvas nitrílicas livres de cloretos (Figura 7A). Os 8 suportes para velas úmidas foram produzidos com o auxílio da Prefeitura do Campus da Universidade Federal do Maranhão. Foram feitas algumas alterações em sua construção, pois não seriam fixados ao solo (Figura 4).

Os compostos e indicadores químicos em sua maioria foram fornecidos nos laboratórios de química da UFMA, os demais em revendas de produtos químicos em São Luís.

Para todos os locais escolhidos foi primeiramente enviado um Ofício aos seus respectivos responsáveis com o pedido e autorização para instalação dos aparatos no teto dos prédios.

Passados 31 dias de exposição, as velas úmidas foram coletadas e transportadas ao laboratório para a análise química e obtenção do teor de Cl^- . Foram retiradas as gazes que estavam revestindo os cilindros de polietileno e com auxílio de pinças cada uma foi colocada em um recipiente contendo 200 ml de água destilada. Após 10 minutos, com as mãos revestidas com as luvas nitrílicas (Figura 7A), para não ocorrer a contaminação das amostras com os cloretos existentes na pele humana. Cada amostra de gaze foi pressionada e o líquido extraído foi misturado com a solução de glicerol contida no erlenmeyer. Em seguida, coletou-se uma alíquota de 50 ml para a análise de titulação mercurimétrica, de acordo com as etapas descritas na NBR ABNT 6211:2001.



Figura 6. A-E. Materiais e procedimentos realizados no laboratório: **a)** Preparação da vela úmida; **b)** Ácido octanóico e glicerina, para a solução; **c)** Preparação da solução; **d)** branco; **e)** velas úmidas protegidas e prontas para o experimentos de campo.

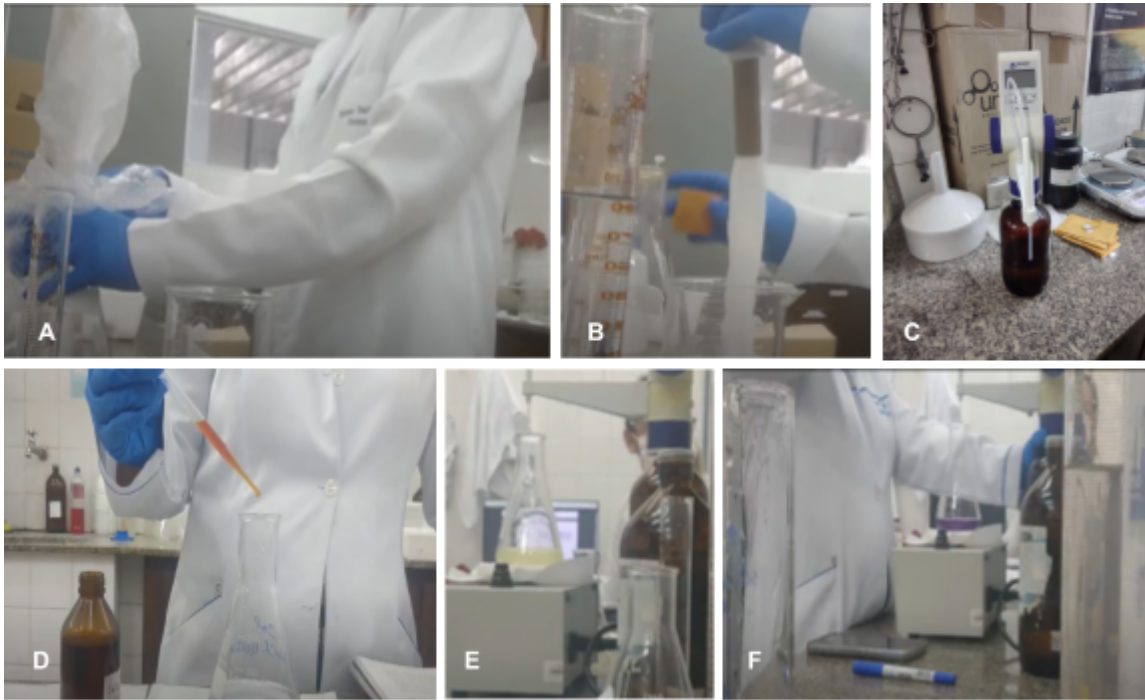


Figura 7. A-F. Retirada da proteção (A), diluição das amostras (B), preparação da titulação (C), adição do reagente (D), titulação (E), reação da titulação (F).

3.4 Análises

As análises realizadas neste estudo envolveram procedimentos estatísticos, espaciais e climatológicos, com o objetivo de investigar a variabilidade espacial e sazonal da deposição de Cl^- em São Luís (MA) e sua relação com o regime de ventos em superfície. A abordagem adotada permitiu integrar dados químicos obtidos em campo com informações meteorológicas provenientes da reanálise ERA5, garantindo uma interpretação robusta dos processos físicos associados à intrusão de aerossóis marinhos.

Inicialmente os valores de deposição de Cl^- ($\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$), obtidos pelo método de vela úmida, foram organizados por ponto amostral e por período experimental (jul/ag e out/nov de 2024). Foram realizadas análises descritivas básicas, incluindo valores mínimos, máximos e comparação entre períodos, com o intuito de identificar padrões gerais de distribuição espacial e diferenças sazonais.

A análise espacial de deposição salina foi conduzida considerando a distância dos pontos de coleta em relação à linha de costa e suas respectivas cotas altimétricas, conforme a distribuição espacial e os relevos apresentados nas Figuras 3 e 7. Essa

abordagem permitiu avaliar o comportamento do decaimento continental dos Cl^- e verificar a influência do relevo e da topografia urbana na penetração dos aerossóis marinhos. A interpretação dos resultados levou em consideração a presença de barreiras físicas naturais e artificiais, como edificações, vegetação arbórea e variações de altitude (Figura 9), que podem modificar localmente o transporte atmosférico.

Para quantificar a relação entre a deposição de Cl^- e as variáveis ambientais e climatológicas. O coeficiente da correlação (r) foi calculada entre o teor de cloretos e: (i) a distância da linha de costa e (ii) a cota altimétrica dos pontos amostrais, separadamente para cada período de coleta. A significância estatística das correlações foi avaliada por meio do valor de p , adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$), conforme recomendado por Bussab e Morettin (2017).

No que se refere a análise meteorológica, os dados de vento a 10 m de altura provenientes da reanálise ERA5 foram utilizados para caracterizar o regime atmosférico atuante durante os experimentos. Foram analisadas a climatologia mensal da velocidade do vento no período de (1980-2024). Essa análise possibilitou identificar, se os experimentos ocorrem sob condições atmosféricas típicas ou anômalas, fator essencial para a interpretação das variações observadas na deposição de cloretos (Figura 8).

As anomalias de velocidade de vento para os meses de julho e outubro de 2024 foram calculadas pela diferença entre os valores observados nesses meses e a climatologia correspondente (1980 a 2024). Permitindo avaliar se os experimentos ocorreram sob condições típicas ou anômalas, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.

A integração entre as análises estatísticas e meteorológicas permitiu interpretar de forma consistente os padrões observados de deposição de Cl^- , destacando o papel do regime de ventos, da sazonalidade climática e das características geomorfológicas locais no controle da intrusão do spray marinho no município de São Luís.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A coleta de Cl^- revelou padrões claros e algumas anomalias nas penetração de aerossóis marinhos na atmosfera de São Luís, Maranhão. As coletas foram realizadas em dois períodos, um de transição entre o período chuvoso e seco (02 de julho a 02 de agosto) e outro durante o período de estiagem (02 de outubro a 02 de novembro).

De acordo com as tabelas 3 e 4 percebe-se a relação entre a concentração do teor de cloretos e a distância do mar de cada ponto de coleta. Essa relação fica mais nítida quando observada a Figura 8.

Tabela 3. Concentração dos Cl^- nos 8 pontos de coleta para o experimento realizado no período de transição chuvoso-seco de 2024 (Jul/Ago).

| Pontos | Distância do mar (m) | Cloreto ($\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$) |
|--------|----------------------|---|
| P1 | 42 | 25,51 |
| P2 | 17 | 159,71 |
| P3 | 180 | 6,34 |
| P4 | 243 | 27,53 |
| P5 | 944 | 18,29 |
| P6 | 2.058 | 20,04 |
| P7 | 4.831 | 8,71 |
| P8 | 6.198 | 5,27 |

Tabela 4. Concentração dos Cl^- nos 8 pontos de coleta para o experimento realizado no período de transição de ventos de 2024 (Out/Nov).

| Pontos | Distância do mar (m) | Cloreto ($\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$) |
|---------------|-----------------------------|---|
| P1 | 42 | 134,87 |
| P2 | 17 | 208,55 |
| P3 | 180 | 63,90 |
| P4 | 243 | 182,28 |
| P5 | 944 | 86,55 |
| P6 | 2.058 | 69,65 |
| P7 | 4.831 | 33,99 |
| P8 | 6.198 | 21,54 |

A figura 8 apresenta a relação entre a distância da linha da costa e o teor de Cl^- para os dois períodos analisados. Observa-se um comportamento contrastante entre os experimentos, com maior dispersão dos dados no período de julho/agosto e um decaimento mais definido das concentrações com o afastamento da orla no período de outubro/novembro, indicando a influência direta do regime atmosférico sobre a penetração no município dos aerossóis marinhos.

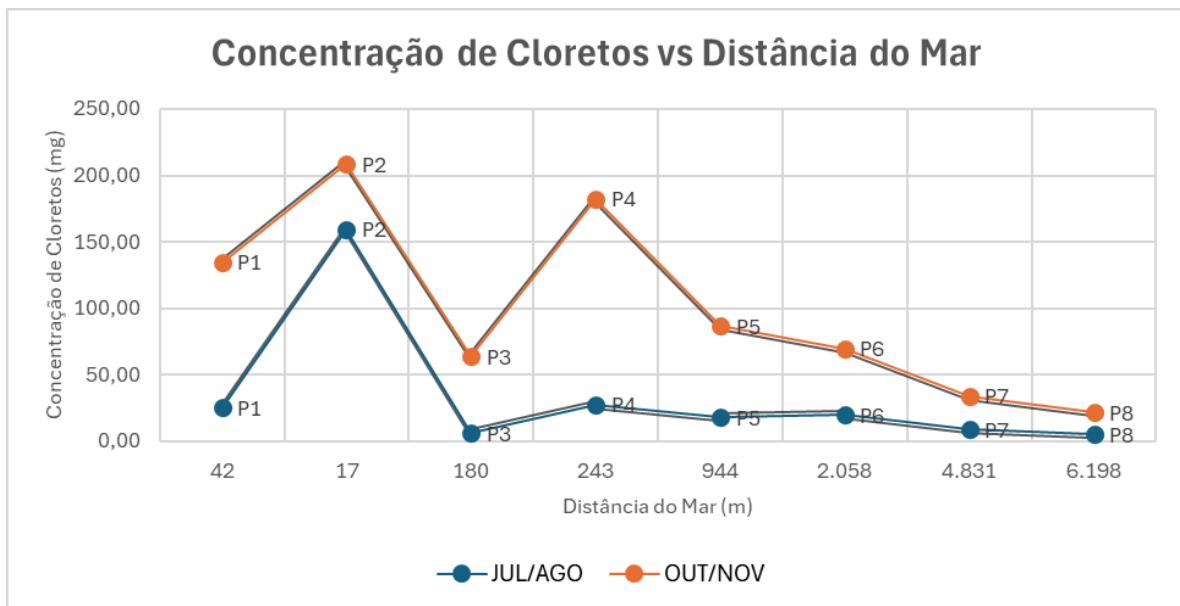


Figura 8. Relação entre a distância da linha de costa e teor de Cl^- ($\text{mg}/\text{m}^2.\text{d}$) nos períodos de julho/agosto e outubro/novembro de 2024 em São Luís (MA).

A análise da correlação entre as concentrações de Cl^- e as variáveis ambientais nas duas estações do ano analisadas foi feita por meio da Correlação de Pearson (Bussab; Morettin, 2017). Essa correlação também foi analisada em termos da distância do ponto em relação a linha d'água e em relação a sua cota altimétrica (Figura 9). Ela foi empregada para quantificar a força e a direção da relação linear entre o teor de Cl^- e as variáveis ambientais como a distância dos pontos de coleta em relação a linha de costa e a cota altimétrica. Um coeficiente de Pearson próximo de +1 indica uma forte correlação positiva, enquanto um valor próximo de -1 sugere uma forte relação negativa. Valores próximos de zero indicam ausência de uma relação linear significativa. Esta abordagem estatística é fundamental para determinar o grau de influência que cada uma dessas variáveis exerce sobre a penetração dos aerossóis marinhos no município de São Luís.

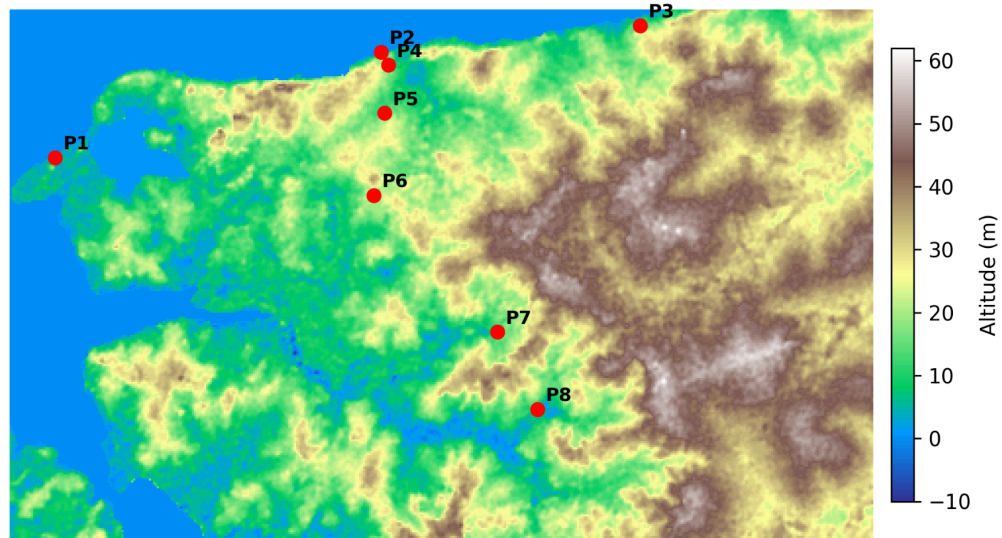


Figura 9. Mapa topográfico do município de São Luís, com os pontos amostrais. Fonte: Recorte feito a partir dos dados (SRTM / OpenTopography) .

Durante o período de julho/agosto, que corresponde a fase de maior umidade relativa do ar e ocorrência de chuvas residuais sobre o município de São Luís, observou-se uma correlação negativa fraca ($r = -0,40$; $p = 0,3265$), conforme indicado na Figura 10. Esse resultado mostra que o teor de cloretos e a distância do mar por si só não foi o único fator, e outras variáveis podem ter tido influência, a elevada umidade atmosférica e a ocorrência de chuvas residuais em São Luís podem ter modulado os processos de transporte, deposição e remoção dos aerossóis marinhos, reduzindo a clareza do gradiente espacial esperado em função da distância ao mar.

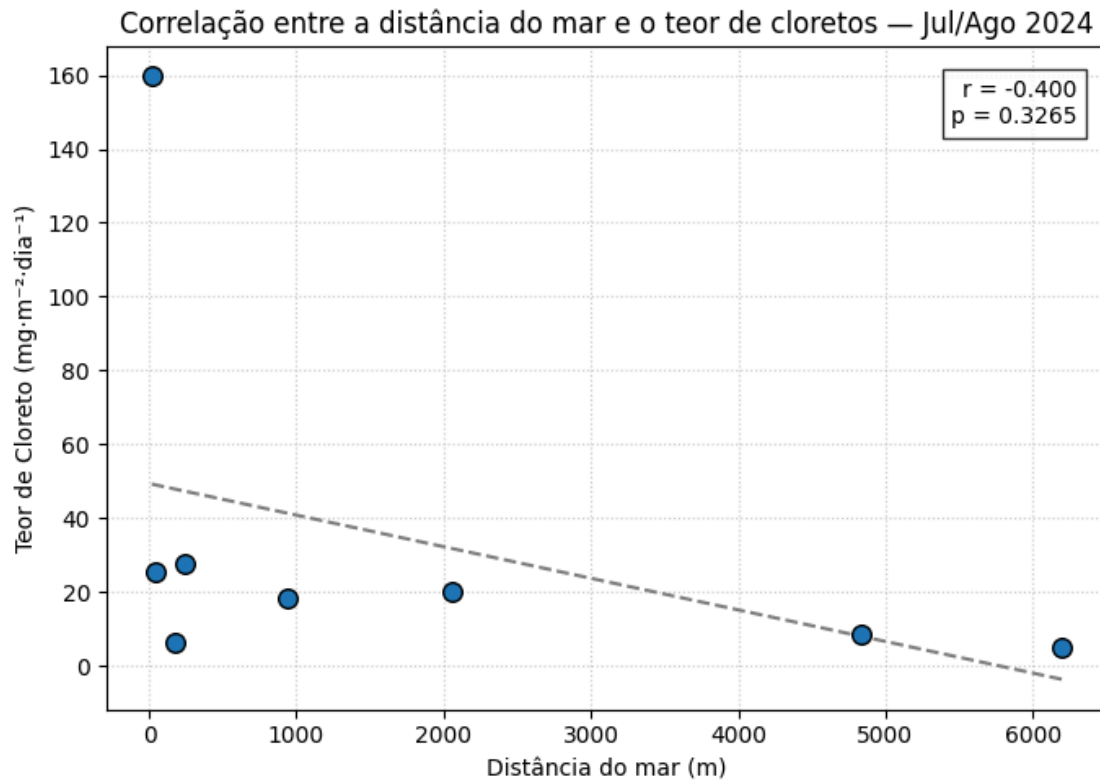


Figura 10. A correlação entre a distância da linha de costa e o teor de Cl^- ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) no período de transição de chuvas para estiagem com ventos irregulares, julho/agosto de 2024.

Já no período de outubro/novembro, com a menor precipitação, e a maior insolação e intensificação dos ventos alísios de nordeste, verificou-se uma correlação forte e negativa ($r = -0.751$) e estatisticamente significativa ($p = 0.0316$), conforme a apresentação na Figura 11. Esse comportamento está de acordo com os estudos de modelagem da CLA marinha, os quais demonstram que a intensidade e a persistência dos ventos, especialmente sob regimes dominados pelos ventos alísios, controlam de forma significativa o transporte, a dispersão e a penetração continental dos aerossóis marinhos (Caffrey et al, 2006).

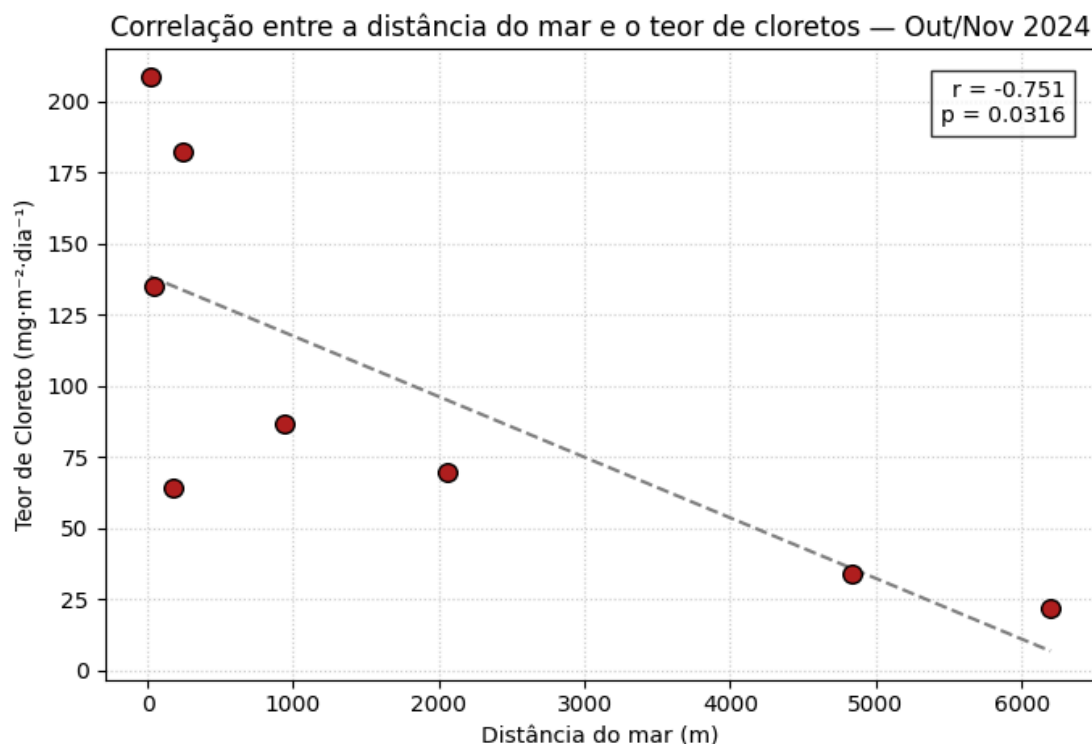


Figura 11. A correlação entre a distância da linha de costa e o teor de Cl^- ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) no período estiagem e forte regime de ventos de outubro/novembro de 2024.

Entre as variáveis Cota de elevação e Teor de cloretos julho/agosto a correlação apresentada na Figura 12, foi fraca e negativa ($r = 0.446$), e não estatisticamente significativa ($p = 0.2682$). Seguindo uma conclusão semelhante, no período de outubro/novembro a correlação foi muito fraca e negativa ($r = 0.296$), e não estatisticamente significativa ($p = 0,4770$), conforme mostrado na figura 13. Esses resultados sugerem que a cota de elevação, isoladamente, não apresentou uma forte correlação linear com o teor de cloreto nos pontos estudados, ou que seu efeito pode estar relacionado a barreiras físicas, como observados no caso do Ponto 3 (ASBOA).

Valores máximos próximos à orla, como os encontrados neste estudo, refletem a maior influência do spray marinho nas zonas mais expostas aos ventos dominantes, processo reforçado pela presença dos ventos alísios de leste e nordeste, que transportam partículas marinhas para o interior do continente durante boa parte do ano.

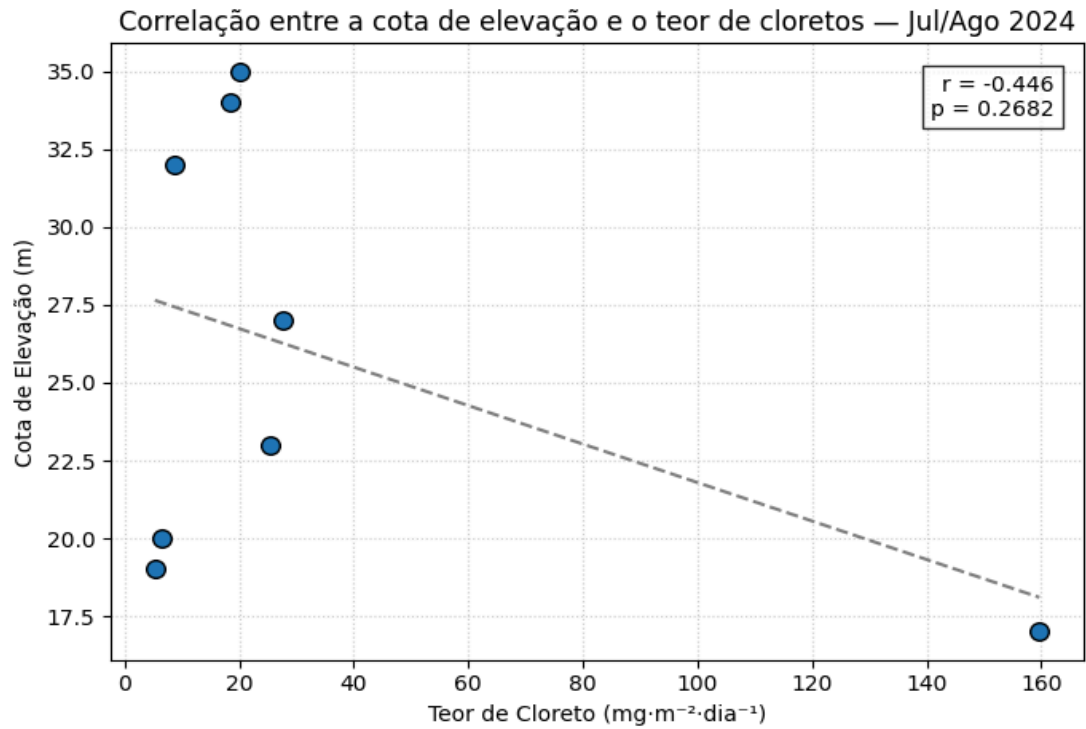


Figura 12. A correlação entre a cota de elevação e o teor de Cl^- ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) no período de transição de chuva para estiagem de julho/agosto de 2024.

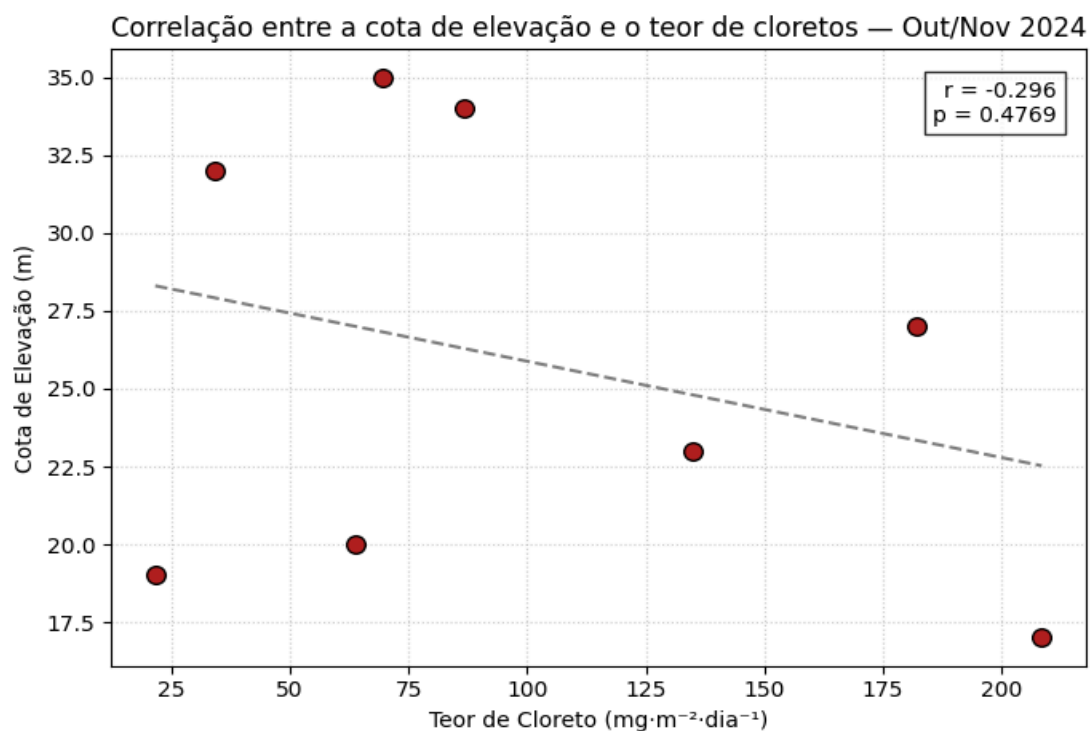


Figura 13. Correlação entre a cota de elevação e o teor de Cl^- ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) no período de estiagem de outubro/novembro de 2024.

Estudos sobre a circulação atmosférica em regiões costeiras tropicais apresentam elevada variabilidade sazonal, associada à atuação dos ventos alísios e à deposição da ZCIT, os quais modulam o regime de vento, precipitação e umidade ao longo do ano (Moura & Shukla, 1981; Molion, 1987. Nobre & Shukla, 1996; Hastenrath, 2006). Essa variabilidade exerce influência direta sobre os processos de transporte e deposição de partículas marinhas em áreas costeiras (Campos, 2016; Alcántara et al., 2017).

A climatologia mensal da velocidade do vento, obtida a partir da reanálise ERA5 (Figura 14), evidencia um ciclo sazonal bem definido, com intensificação dos ventos entre os meses de agosto e novembro, período que coincide com as maiores taxas de deposição de Cl^- observadas neste estudo.

A deposição de aerossóis marinhos em ambientes costeiros é fortemente condicionada pela intensidade e persistência dos ventos, bem como pelas características locais de relevo e rugosidade superficial, fatores que controlam o alcance do spray marinho continente adentro (Borba, Junior, 2011).

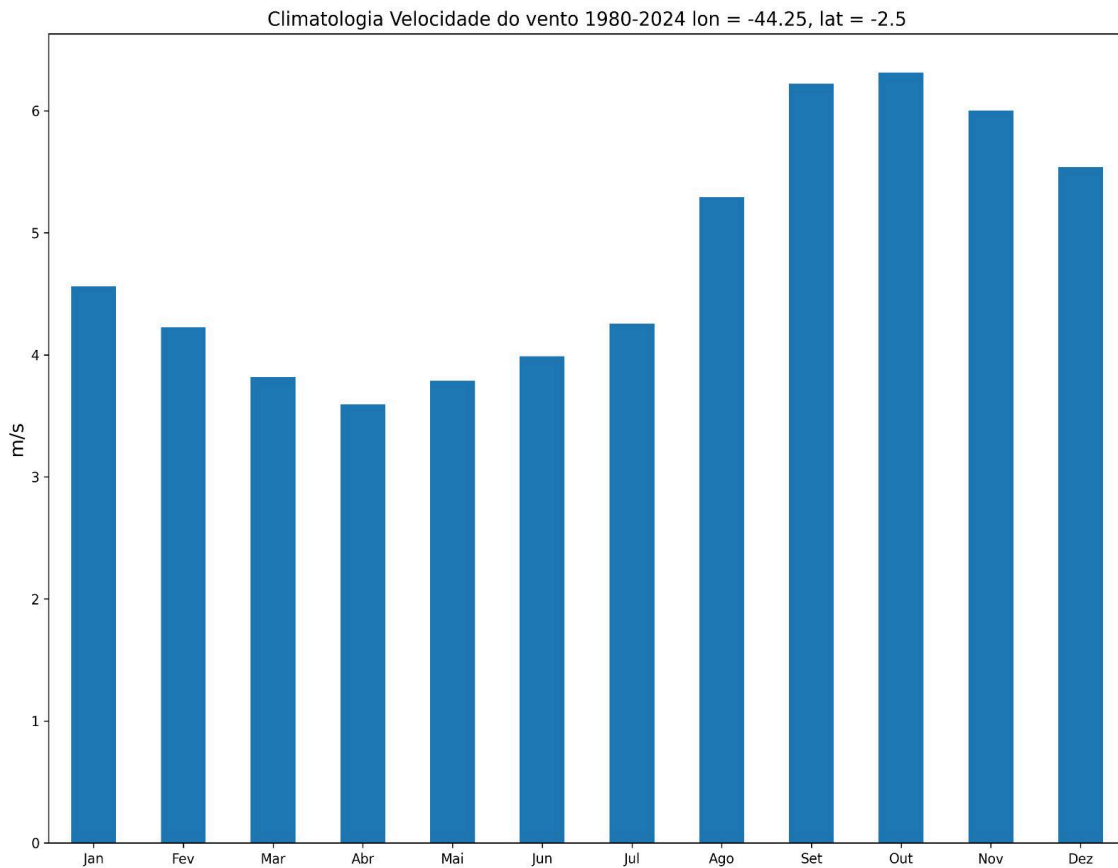


Figura 14. Climatologia mensal da velocidade do vento a 10 m de altura (1980-2024), obtida a partir da reanálise ERA5 para a região costeira de São Luís (MA).

A série temporal de longo prazo da velocidade do vento, obtida a partir da reanálise ERA5 para o período de 1980 a 2024 (Figura 15), evidencia a recorrência de um ciclo sazonal bem definido, marcado por maiores intensidades dos ventos no segundo semestre do ano e menor intensidade no primeiro semestre. Observa-se ainda elevada variabilidade em escala diária, característica da circulação atmosférica na CLA costeira. Esse comportamento reforça as diferenças observadas entre os períodos de julho/agosto e outubro/novembro não são episódicas, mas inseridas em um padrão atmosférico persistente de longo prazo.

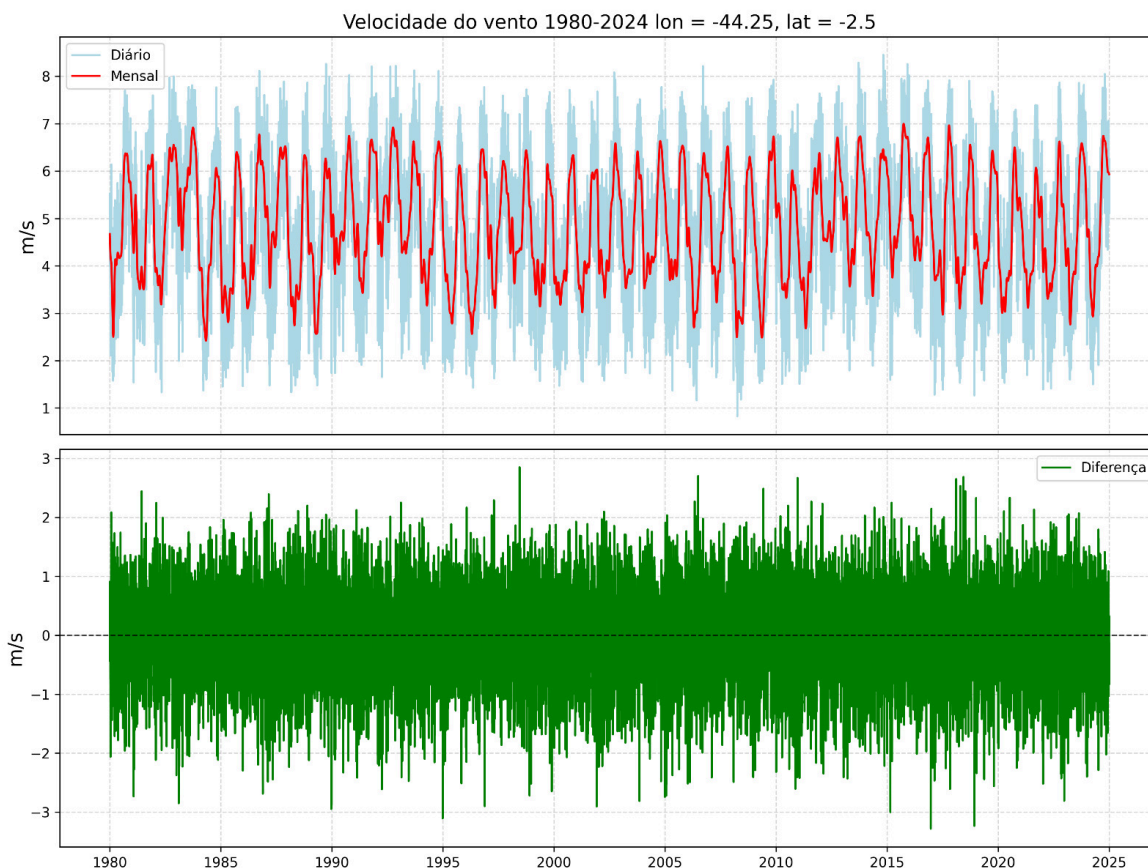


Figura 15. Série temporal da velocidade do vento a 10 m de altura no período de 1980 a 2024, com valores diários (verde claro), médias mensais (vermelho) e desvios em relação à climatologia (verde), obtida na reanálise ERA5.

O padrão geral do decaimento conforme esperado, tende a diminuir à medida que a distância da linha de costa aumenta, ou seja, em direção ao interior do município. O ponto mais distante, P8 (6.198 m do mar), consistentemente apresentou os menores teores de cloreto em ambos os períodos. A variação sazonal entre os dois períodos de coleta está diretamente associada às condições atmosféricas atuantes. Conforme indicado pela evolução da velocidade do vento em 2024 (Figura 16), o período de outubro/novembro apresenta valores médios mais elevados em relação a julho/agosto, o que favorece o transporte continental de aerossóis marinhos e explica os maiores teores de Cl^- registrados nesse período. Por exemplo o ponto P1 registrou 25,51 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$ em julho/agosto e 134,87 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$ em outubro/novembro; P2 registrou 159,71 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$ e 208,55 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$, respectivamente (Figura 16; Tabelas 4 e 5).

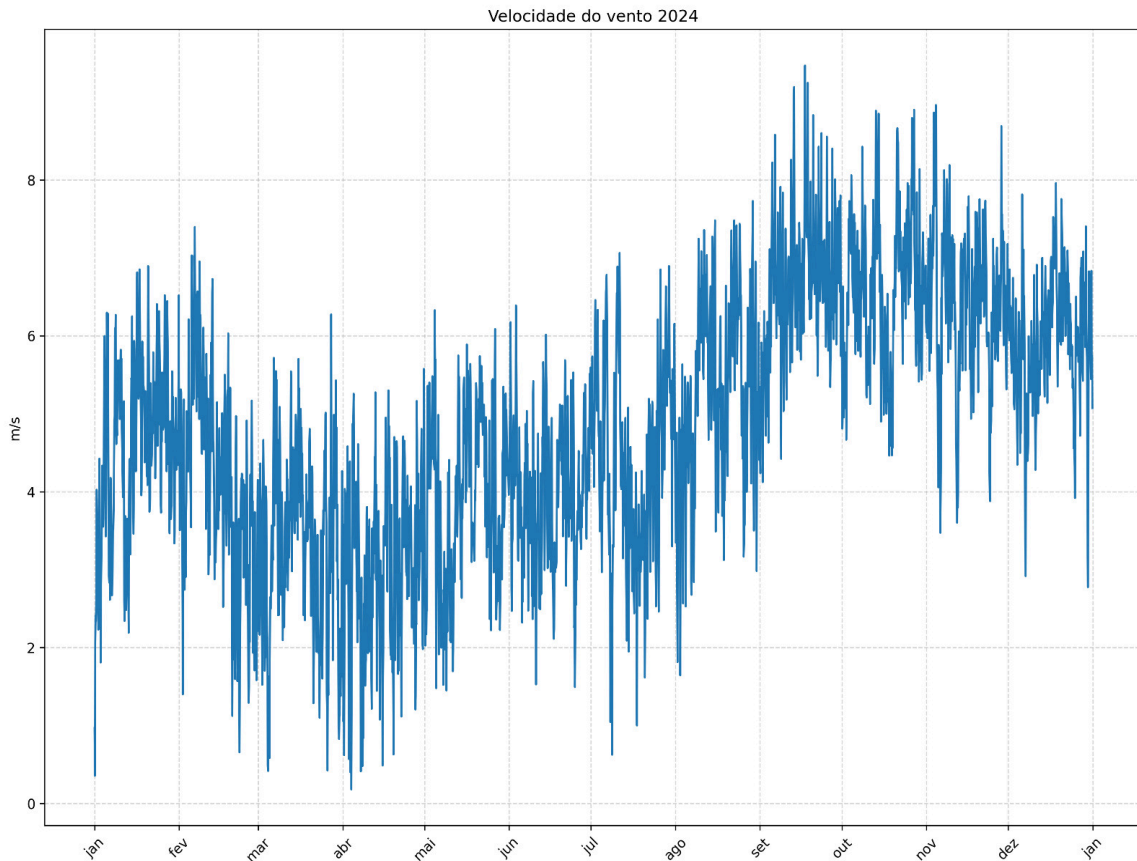


Figura 16. Evolução da velocidade do vento a 10 m de altura ao longo do ano de 2024 para a região de São Luís (MA), obtida a partir da reanálise ERA5.

Houve também pontos com comportamentos atípico, como o P2, localizado à 17 metros da costa, neste ponto foi registrado as maiores concentrações de Cl^- em ambos os períodos, no entanto ficou evidente uma forte interferência de barreiras físicas neste ponto, como árvores e um beiral na estrutura do banheiro público, o que pode ter influenciado na concentração. Também ocorreu um comportamento distinto, na primeira análise do ponto 3 à 180 metros da linha de costa, seu teor de cloreto ($6,34 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) foi muito baixo, inclusive menor que os pontos mais distantes, como o P5, P6 e P7. Já na segunda análise, embora tenha aumentado para $63,90 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, ainda foi menor que os pontos P1 e P4, que estão à distâncias comparáveis ou maiores. As condições atmosféricas de grande escala durante os períodos de coleta ajudam a contextualizar esses comportamentos espaciais. As anomalias diárias da velocidade do vento indicam que, durante o mês de julho de 2024, predominaram anomalias neutras a negativas (Figura 17), caracterizando condições menos favoráveis ao transporte continental de

aerossóis marinhos. Em contraste, no mês de outubro de 2024 observam-se anomalias positivas persistentes (Figura 18), associadas à intensificação dos ventos alísios de nordeste, o que favorece a maior penetração e deposição de Cl^- sobre o continente.

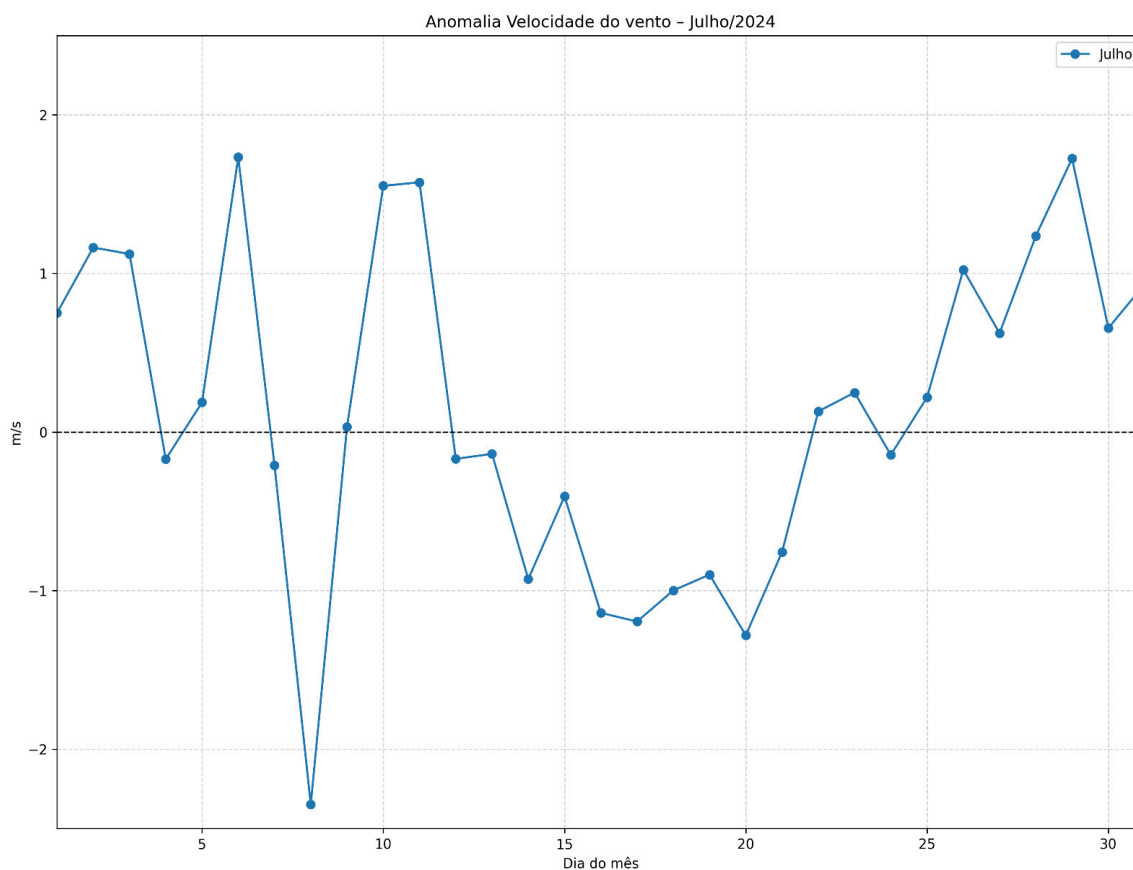


Figura 17. Anomalia diária da velocidade do vento a 10 m de altura durante julho de 2024 em relação à climatologia 1980-2024, obtido pela reanálise ERA5.

As condições atmosféricas mais organizadas favorecem uma deposição mais concentrada nas áreas costeiras, com redução progressiva das concentrações em direção ao interior, padrão coerente com os resultados observados neste estudo. Nessa época do ano, a ZCIT encontra-se deslocada para o hemisfério norte, favorecendo a predominância de ventos de nordeste mais constantes e intensos sobre a região de São Luís. Esse regime atmosférico promove o transporte e a deposição de partículas salinas ao longo da orla do município com redução progressiva das concentrações em direção ao interior, conforme ilustrado na Figura 18.

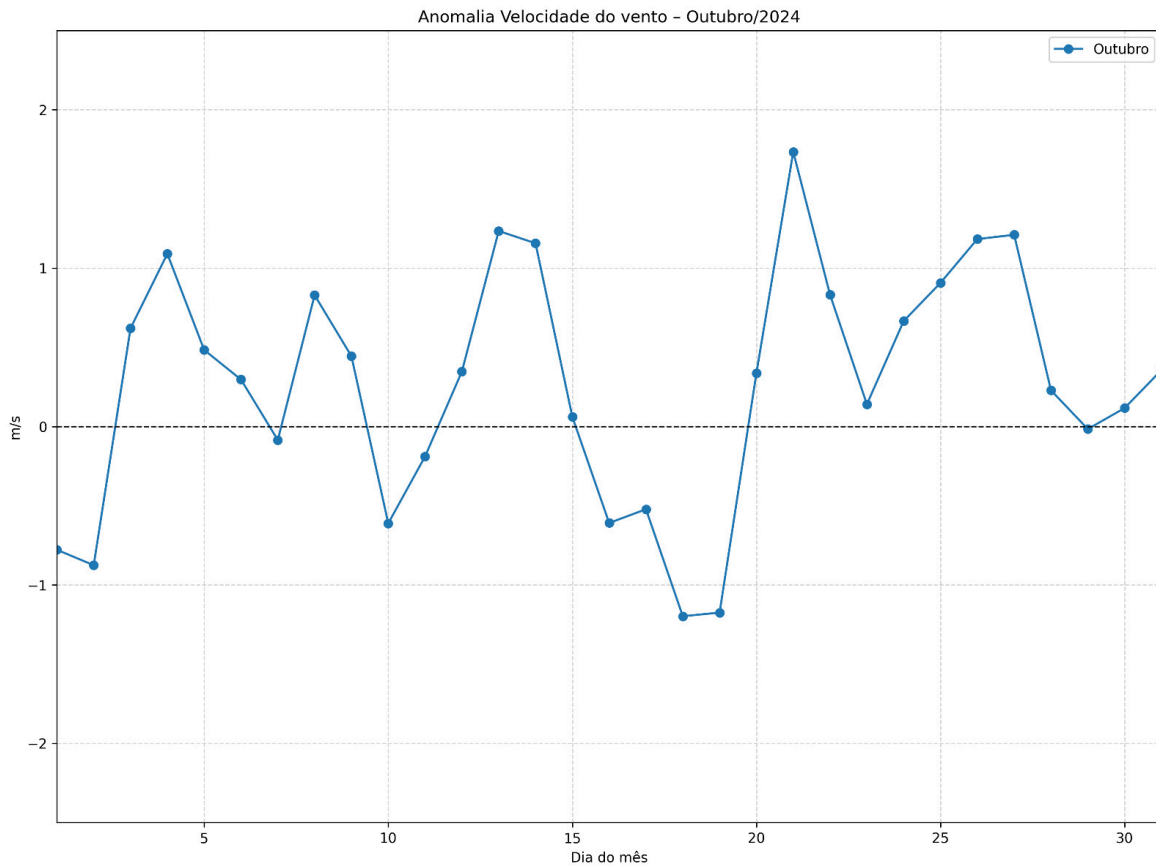


Figura 18. Anomalia diária da velocidade do vento a 10 m de altura durante outubro de 2024 em relação à climatologia 1980-2024, obtida da reanálise ERA5.

A deposição de cloretos medida em São Luís neste estudo apresenta padrões que se alinham de forma consistente com a de outros artigos (Tabela 5), especialmente quando comparada às capitais costeiras que utilizam a metodologia de vela úmida (Tabela 5). O comportamento de forte redução com a distância em relação ao mar é recorrente em ambientes tropicais úmidos e pode ser confirmado de forma clara em estudos realizados no Nordeste e em outras regiões do litoral brasileiro (Portela, 2013; Filho & Neves, 2023). Valores máximos próximos à orla, como os encontrados neste estudo, refletem a maior influência do spray marinho nas zonas mais expostas aos ventos dominantes, processo reforçado pela presença dos ventos alísios de leste e nordeste, que transportam partículas marinhas para o interior do continente durante boa parte do ano.

Em termos dos resultados obtidos, os diagramas vetoriais do tipo *stick plot* (Figura 19) evidenciam a predominância de ventos de nordeste durante o período de outubro/novembro, com maior constância e intensidade em comparação ao período de julho/agosto. Esse padrão direcional favorece o transporte direto de aerossóis marinhos do oceano em direção ao continente, corroborando os maiores teores de Cl^- observados nesse período.

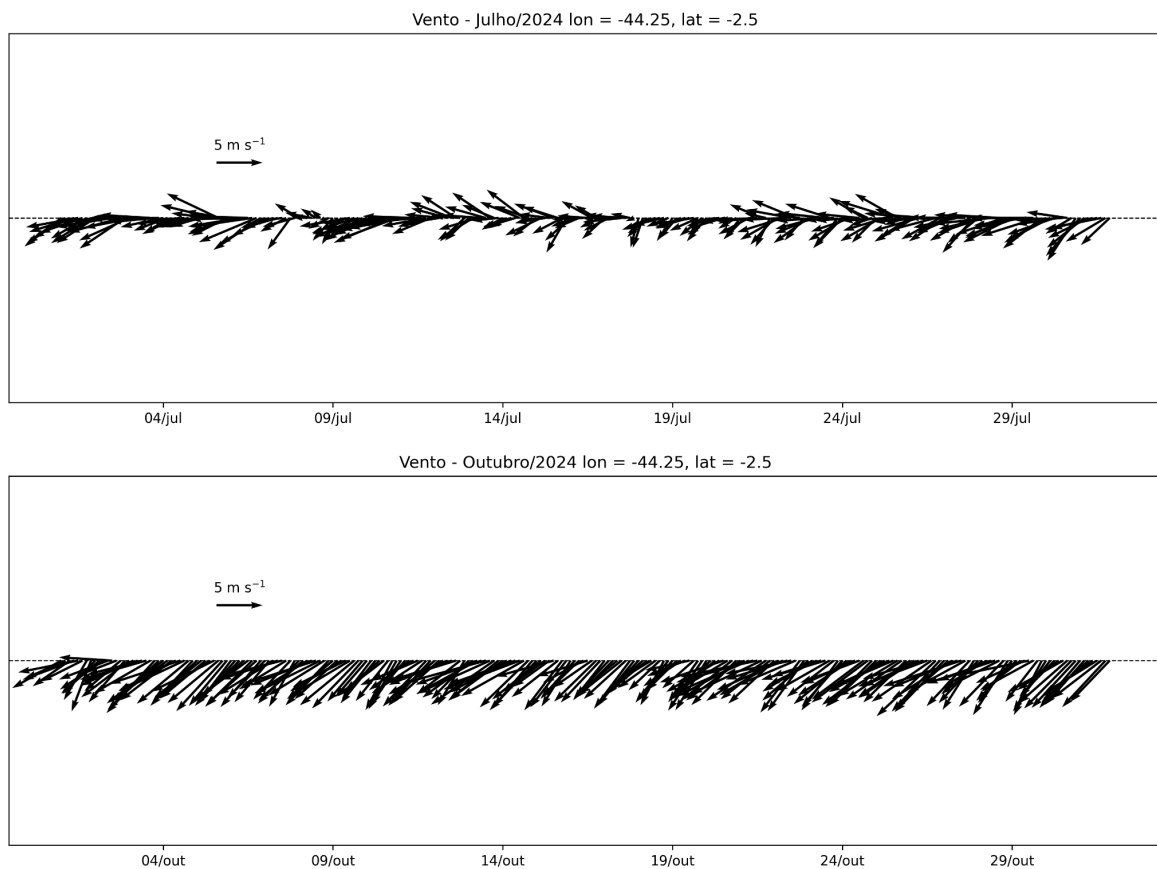


Figura 19. Diagramas vetoriais (*stick plot*) do vento a 10 m de altura durante julho e outubro de 2024, obtidos de reanálise ERA5.

Os resultados revelaram que o teor de Cl^- em São Luís é influenciado pela distância da linha de costa com destaque para o regime de ventos em superfície.

4.1 Comparação com Outros Estudos do Brasil

Maccachero & Tavares (2017) avaliaram a capacidade de transporte atmosférico e o alcance continental do spray marinho utilizando o método da vela úmida na Barra da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Os autores observaram que a penetração dos Cl^- na atmosfera é significativa em áreas próximas à orla com concentrações elevadas de Cl^- (1,62 - 171,24 mg/(m².d)), com uma redução notável a partir dos 500 m da linha costeira, destacando a influência da velocidade e direção dos ventos.

Comparativamente, o presente estudo apresenta valores máximos mais elevados, coerentes com a maior exposição de São Luís aos ventos oceânicos e à ausência de barreiras topográficas significativas. Ainda assim, ambos os trabalhos confirmam a relação a relação inversa entre concentração de cloretos e distância da linha de costa.

Resultados parecidos foram encontrados por Portella (2013) em Fortaleza (CE), onde as concentrações variaram de 162 e 670 mg/(m².d), a uma distância entre 100 m e 1.000 m da costa, apresentou uma alta concentração, associada à exposição direta dos ventos alísios. A autora destacou que a dinâmica dos ventos intensos e constantes na faixa litorânea do Nordeste contribui para o transporte eficiente de partículas salinas, o que explica, em parte, as concentrações elevadas registradas nos pontos mais próximos à praia.

Os resultados do presente estudo situam-se dentro da mesma ordem de grandeza, especialmente nos pontos mais próximos à costa, indicando que ambientes costeiros abertos no Nordeste brasileiro apresentam padrões semelhantes de agressividade atmosférica, ainda que modulados por características locais, como urbanização e orientação da linha de costa.

Barbosa et al. (2024), analisando ambientes costeiros de Cabo Frio (RJ), registraram uma faixa ainda mais ampla (50,55 - 523,34 mg/(m².d)) em distância entre 35 e 1400 m, o estudo reforçando que regiões sob forte ação de ventos marítimos apresentam deposições mais intensas. A presença de clima semiárido e a maior frequência de ventos fortes nesse trecho do sudeste brasileiro potencializam o transporte de sais para áreas mais afastadas da linha de costa, ampliando o alcance continental do spray marinho.

Em comparação com o presente estudo apresenta comportamento semelhante no que se refere à redução da concentração de Cl^- com a distância. Embora as diferenças nos valores absolutos, ambos os trabalhos confirmam a importância das condições meteorológicas locais no controle da agressividade atmosférica.

Em Vitória (ES), estudos regionais (Calmon et al. 2009) indicaram deposições entre 9,64 e 503,75 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$ em uma distância entre 10 a 520 m, também associados à intensidade dos ventos, porém com atenuação mais rápida em função da barreira criada pelas edificações e pelo relevo urbano. Esse efeito é relevante para a comparação com o presente estudo em São Luís, uma vez que parte da cidade apresenta áreas mais abertas voltadas para o oceano, facilitando a entrada dos aerossóis marinhos e evidenciando o decaimento da concentração em relação com o aumento da distância.

Filho & Neves (2023) em um estudo sobre a agressividade ambiental do ar atmosférico na porção norte de São Luís (MA), também utilizando a norma regulamentadora ABNT NBR 6211/2001, embora com o Método de Mohr (Gaines; Parker; Gascho, 1984) para análise, confirmaram a agressividade ambiental do ar atmosférico. Registraram uma deposição entre 79,47 - 452 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$, com intensidade no período seco e queda no período chuvoso, reforçando a dependência direta entre a deposição salina, regime de ventos e sazonalidade climática.

O presente estudo corrobora esses achados, ao demonstrar que, além da intensidade e direção dos ventos e da distância, fatores como obstáculos urbanos, da rugosidade superficial afetam a distribuição espacial da concentração de Cl^- .

Quando comparados aos estudos citados acima, os valores registrados neste trabalho (5 - 208 $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$) mostram-se consistentes com a literatura nacional, situando-se dentro das faixas reportadas em regiões de clima litorâneo. A concentração máxima, observada nos período de estiagem, é caracterizada por menor precipitação em São Luís e maior predominância e intensidade dos ventos, condições que favorecem a entrada e deposição de aerossóis marinhos.

Essa configuração atmosférica resulta em uma deposição mais intensa nas áreas costeiras, conforme observado em estudos realizados no litoral maranhense e nordestino os quais destacam a influência do regime de ventos e da variabilidade sazonal sobre os processos oceano-atmosfera (Reis et al., 2024; Cavalcanti et al., 2009; Portella, 2013).

Nessa época do ano, a ZCIT encontra-se deslocada para o hemisfério norte, e os ventos de nordeste predominam com maior constância e velocidade, transportando e depositando partículas salinas ao longo da orla do município e sua diminuição progressiva continente adentro.

Desta forma, embora exista uma tendência de redução de sais com o afastamento da orla, a atmosfera mais úmida e a maior frequência de precipitações favorecem a lavagem e dispersão dos aerossóis marinhos, diminuindo a influência direta da distância da linha de costa sobre os teores medidos.

Isso sugere que, no período de transição, a distância por si só não foi o único fator, mas também a altitude e principalmente a velocidade e o regime de ventos em superfície.

Tabela 5. Comparação com outros estudos realizados no Brasil referentes a íons cloro.

| Autor | Ano | Local | Método | Distâncias (m) | Concentração (mg/(m².d)) | Observações |
|---------------------------------|------------|----------------------|-------------------|---------------------------|--|--|
| Portella | 2013 | Fortaleza – CE | Vela úmida | 100–1000 | 172,41–677,15 | Maior deposição próxima ao mar; redução exponencial com distância. |
| Maccachero & Tavares | 2017 | Barra da Tijuca – RJ | Vela úmida | 55–6.130 | 1,62–171,24 | Forte influência da direção do vento e exposição oceânica. |
| Calmon et al. | 2009 | Vitória – ES | Vela úmida | 10–520 | 9,64–503,75 | Zona urbana densamente construída; redução pela barreira de edificações. |
| Barbosa et al. | 2024 | Cabo Frio – RJ | Vela úmida | 35–1400 | 50,55–523,34 | Clima semiárido com ventos fortes; deposição elevada na orla. |
| Filho & Neves | 2023 | São Luís – MA | Vela úmida (Mohr) | 10–1800 | 79,37–452,40 | Aumento significativo no período seco; SO–NE, como direção dominante. |
| Este trabalho | 2024 | São Luís – MA | Vela úmida – ERA5 | 17–6200 | 5–208 | Concentração máxima no período seco (out/nov); forte correlação com vento. |

5 CONCLUSÕES

A análise do alcance e a penetração do spray marinho no município de São Luís, por meio da determinação da distância, a partir da linha de costa, em que a concentração de Cl^- na atmosfera como esperado os mais próximos à linha da costa, P1, P2 e P4 se mantêm com concentrações de teores de cloretos mais concentrados, já o baixo teor no ponto 3, tem como prováveis fatores para a concentração não esperada, os obstáculos físicos artificiais e naturais, como árvores, prédios, casas e muros altos. Os demais pontos seguem como esperado, com a maior distância, menor a concentração de Cl^- , sendo o P8 o ponto mais distante e conseqüentemente o de menor teor de cloretos e o menos significativo em relação aos demais, mas ao mesmo tempo ainda agressivo devido a concentração de Cl^- ter quase quadruplicado de um período de coleta ao outro.

O aparato de vela úmida descrito na norma NBR 6211-2001, mostrou-se efetivo para a obtenção de Cl^- na atmosfera, mesmo fazendo adaptações pontuais não houve prejuízo aos resultados obtidos, pois é necessária a adequação ao ambiente e à materiais que não foram possíveis naquele momento de serem obtidos. Este estudo avaliou que a penetração dos cloretos são influenciados por diversas variáveis, como: velocidade, intensidade e direção dos ventos, distância das amostras em relação ao mar, barreiras físicas naturais e artificiais.

Os resultados demonstram que a penetração do spray marinho no município de São Luís é fortemente condicionada pelo regime de ventos atuante na CLA a intensificação e a persistência dos ventos de nordeste durante o período seco, evidenciadas pelos dados da reanálise ERA5, explicam os maiores teores de Cl^- observados nesse período e a relação com a distância da linha da costa.

No período de transição chuvoso-seco, a maior variabilidade do vento e a atuação de processos de remoção úmida reduzem a eficiência do transporte continental dos aerossóis marinhos, atenuando a relação direta entre distância e deposição salina.

A CLA constitui o principal sistema físico responsável pelo controle do transporte e da deposição dos aerossóis marinhos em São Luís. A interação entre perfis verticais de vento, estabilidade atmosférica, rugosidades da superfície, turbulência explicam os padrões de concentração observados neste estudo, confirmando que a CLA é o elemento chave no processo de penetração continental dos sais marinhos.

6 REFERÊNCIAS

Alcántara, J.; de la Fuente, D.; Chico, B.; Simancas, J.; Díaz, I.; Morcillo, M. *Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review. Materials*, 10(4): 406, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10040406>

ALVES, Amara Midiã Correia. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió – AL**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

ALVES, Célia A. **Química entre a microcamada superficial oceânica e os aerossóis marinhos**. *Química Nova*, São Paulo, v. 37, n. 8, p. 1382–1400, 2014.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROSÃO (ABRACO). Por que se preocupar com a corrosão? Disponível em: <https://abraco.org.br/blog/por-que-se-preocupar-com-a-corrosao/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6211: Corrosão atmosférica – Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida**. Rio de Janeiro, 2001. 6 p.

BARBOSA, Renata Cristina Fernandes; BARBOSA, Rodrigo César Fernandes; BARBOSA, Rafael Carlos Fernandes; STRUNKIS, Carolina de Medeiros; CASARTELLI, Evelton Alves; WALLY, Gustavo Bosel; MAGALHÃES, Fábio Costa. **Avaliação da deposição de cloretos através do método da vela úmida: um estudo na cidade de Cabo Frio, RJ**. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 46, e75364, 2024.

BORBA JUNIOR, João C. A. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região Sudeste**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

BUSSAB, Wilton O.; MORETTIN, Pedro A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.

CAFFREY, P. F.; HOPPEL, W. A.; SHI, J. J. **A one-dimensional sectional aerosol model integrated with mesoscale meteorological data to study marine boundary layer aerosol dynamics**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. **111**, D07S17 (2006). DOI: 10.1029/2006JD007237.

CALMON, J. L.; BORBA JR., J. C.; MEIRA, G. R.; TRISTÃO, F. A. **Deposição de cloretos em zona de atmosfera marinha no Sudeste Brasileiro**. Trabalho apresentado no *X Congresso Latinoamericano de Patología y XII Congreso de Calidad en la Construcción*, Valparaíso, Chile, 29 set.–2 out. **2009**. Disponível em: ResearchGate. Acesso em: 15 dez. 2025.

CAMPOS, Ana Mara da Rocha. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L. (orgs.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CUNLIFFE, Michael D.; WURL, Oliver. **Sea surface microlayer in a changing ocean – A perspective**. *Elementa: Science of the Anthropocene*, v. **5**, p. 50, 2017.

FARR, T. G. et al. **The Shuttle Radar Topography Mission**. *Reviews of Geophysics*, v. **45**, n. 2, 2007.

NASCIMENTO, J. E. Ferreira do; FARIAS, C. M. do Nascimento; PIRES, M. L. Torres; ESCHRIQUE, S. A.; SILVEIRA, P. C. A. da. **Variação sazonal de parâmetros físico-químicos na porção estuarina do município de Raposa – MA**. *Interfaces*

Cientificas – Saúde e Ambiente, v. 8, n. 2, p. 257–271, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.17564/2316-3798.2020v8n2p257-271>. Acesso em: 15 dez. 2025.

GAINES, T. P.; PARKER, M. B.; GASCHO, G. J. **Mohr titration for chloride determination in plant tissue**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 15, n. 7, p. 993–997, 1984.

GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

HASTENRATH, S. *Climate Dynamics of the Tropics*. Dordrecht: Springer, 2006.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly journal of the Royal Meteorological Society. Royal Meteorological Society (Great Britain)**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 2021.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement**. New York: Oxford University Press, 1994.

KOJOJ, J., PEREIRA FREITAS, G., MUILWIJK, M., GRANSKOG, M. A., NAAKKA, T., EKMAN, A. M. L., HEUTTE, B., SCHMALE, J., DA SILVA, A., LAPERE, R., MARELLE, L., THOMAS, J. L., MELSHEIMER, C., MURRAY, B. J., & ZIEGER, P. (2024). *An Arctic Marine Source of Fluorescent Primary Biological Aerosol Particles During the Transition from Summer to Autumn at the North Pole*. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 76(1), 47–70, 2024.

LI, Y.; LI, A. K. N.; TAN, S. R. **Atmospheric corrosion of metals in marine environments – a review**. *Corrosion Science*, v. 47, n. 10, p. 2231–2252, 2005.

MACCACHERO, Daniella Parente; TAVARES, Paula de Souza. **Penetrabilidade do spray marinho na região da Barra da Tijuca através do método da vela úmida**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.

MATLAKHOV, Anatoliy Nicolaevich. **Corrosão e proteção dos materiais**. Organização de Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova. 1. ed. Jundiaí, SP: Paco, 2021.

MILLERO, Frank J. **Chemical oceanography**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

MOLION, L. C. B. **Climatologia dinâmica da região amazônica e do Nordeste brasileiro**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 2, n. 1, p. 1–20, 1987.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. **On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, p. 2653–2675, 1981.

NASA. **SMAP Salinity**. Disponível em: <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm>. Acesso em: 03 jun. 2025.

NASA JET PROPULSION LABORATORY. **Sea Surface Salinity**. Disponível em: <https://podaac.jpl.nasa.gov/SeaSurfaceSalinity>. Acesso em: 03 jun. 2025.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v. 9, p. 2464–2479, 1996.

O'DOWD, C. D. **Biogenically driven organic contribution to marine aerosol**. *Nature*, London, v. 431, p. 676–680, 2004.

O'DOWD, C. D.; DE LEEUW, G. **Marine aerosol production: a review of the current knowledge**. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, London, v. 365, p. 1753–1774, 2007.

O'DOWD, C. D. et al. **Marine aerosol formation from biogenic emissions**. *Nature Geoscience*, London, v. 5, p. 520–524, 2010.

PORTELLA, C. S. A. **Avaliação da Durabilidade de Concretos Produzidos Segundo a ABNT NBR 6118:2007 e Expostos aos Cloretos Disseminados em Névoa Salina na Praia do Futuro, em Fortaleza–CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PÖSCHL, Ulrich. **Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects**. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 44, p. 7520–7540, 2005.

REIS, Bruna L. R. **Regime e variabilidade de ondas superficiais...** Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

REIS, Bruna Larissa R. dos; PARISE, Claudia K.; CORREIA, Gustavo S.; LIMA, Leonardo G. de; PEROTTO, Heitor; BOSE, Nicolas de A.; MENDONÇA, Luis Felipe F. **The bimodal regime of ocean waves and winds over the continental shelf of Maranhão**. *Regional Studies in Marine Science*, v. 77, p. 103629, 2024. DOI: 10.1016/j.rsma.2024.103629.

REVIE, R. Winston; UHLIG, Herbert H. **Corrosion and corrosion control: an introduction to materials science and engineering**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

SANTOS, Marcio Freire; NEVES, Rodrigo de Azevedo. **Análise experimental da agressividade ambiental do ar atmosférico na porção norte da cidade de São Luís – MA**. São Luís: Editora UEMA, 2023.

SILVA, Adriana Moreno Costa. **Estudo da influência do spray marinho na salinização das águas do semiárido baiano**. 2012. 252 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

STULL, Roland B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

TOPOGRAPHIC MAP – São Luís, Maranhão. Escala variável. Disponível em: <https://www.topographic-map.com/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

UVO, C. R. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua influência no regime de chuvas no Norte do Nordeste brasileiro**. *Climanálise*, v. 4, n. 12, p. 34–41, 1989.

VAN DER HEIJDEN, A. T. W. M. L. et al. **Trace metals and microbial activity in the sea surface microlayer: a review.** [*Periódico não informado*], [s. l.], [ano não informado].

VERON, Fabrice. **Ocean spray generation.** *Annual Review of Fluid Mechanics*, Palo Alto, v. 47, p. 507–538, 2015.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey.** 2. ed. San Diego: Elsevier, 2006.

WANG, Xin et al. **Microbial and chemical properties of the sea surface microlayer and underlying water.** *Biogeosciences*, Göttingen, v. 14, p. 2469–2480, 2017.

WURL, Oliver et al. **The ocean's vital skin: toward an integrated understanding of the sea surface microlayer.** *Frontiers in Marine Science*, v. 4, p. 165, 2017.

ZHANG, X. et al. **Marine atmospheric corrosion of engineering materials: a review.** *Construction and Building Materials*, v. 238, p. 117769, 2020.

APÊNDICE A - Dados brutos de titulação (jul/ago 2024)

| PONTOS | T1 | T2 | MÉDIA |
|---------------|-----------|-----------|--------------|
| P1 | 3,07 | 3,08 | 3,075 |
| P2 | 14,6 | 14,69 | 14,645 |
| P3 | 1,06 | 1,12 | 1,09 |
| P4 | 3,07 | 3,35 | 3,21 |
| P5 | 2,22 | 2,42 | 2,32 |
| P6 | 2,48 | 2,51 | 2,495 |
| P7 | 1,34 | 1,32 | 1,33 |
| P8 | 0,88 | 1,06 | 0,97 |
| BRANCO | 0,41 | 0,44 | 0,425 |

APÊNDICE B - Dados brutos de titulação (out/nov 2024)

| PONTOS | T1 | T2 | MÉDIA |
|---------------|-----------|-----------|--------------|
| P1 | 14,92 | 14,6 | 14,76 |
| P2 | 22,35 | 23,17 | 22,76 |
| P3 | 7,01 | 7,19 | 7,1 |
| P4 | 19,55 | 19,66 | 19,605 |
| P5 | 9,66 | 9,64 | 9,65 |
| P6 | 7,64 | 7,53 | 7,585 |
| P7 | 3,88 | 4 | 3,94 |
| P8 | 2,53 | 2,67 | 2,6 |
| BRANCO | 0,1 | 0,6 | 0,35 |

APÊNDICE C - Tabelas completas de cálculo de teor de cloretos

(Jul/Ago) 2024 .

| PONTOS | A (ml) | B (ml) | Vt (ml) | Va (ml) | M | S (m²) | t (dias) | Dist.do mar (m) | Cloreto (mg/(m².d)) |
|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------|--------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| P1 | 3,07 | 0,42 | 360 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 42 | 25,51 |
| P2 | 14,6 | 0,42 | 420 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 17 | 159,71 |
| P3 | 1,09 | 0,42 | 354 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 180 | 6,34 |
| P4 | 3,21 | 0,42 | 369 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 243 | 27,53 |
| P5 | 2,32 | 0,42 | 360 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 944 | 18,29 |
| P6 | 2,49 | 0,42 | 362 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 2.058 | 20,04 |
| P7 | 1,33 | 0,42 | 358 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 4.831 | 8,71 |
| P8 | 0,97 | 0,42 | 358 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 6.198 | 5,27 |

(Out/Nov) 2024.

| PONTOS | A (ml) | B (ml) | Vt (ml) | Va (ml) | M | S (m²) | t (dias) | Dist. do mar (m) | Cloreto (mg/(m².d)) |
|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------|--------------------------|-----------------|-----------------------------|---|
| P1 | 14,76 | 0,35 | 350 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 42 | 134,87 |
| P2 | 22,76 | 0,35 | 348 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 17 | 208,55 |
| P3 | 7,10 | 0,35 | 354 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 180 | 63,90 |
| P4 | 19,61 | 0,35 | 354 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 243 | 182,28 |
| P5 | 9,65 | 0,35 | 348 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 944 | 86,55 |
| P6 | 7,59 | 0,35 | 360 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 2.058 | 69,65 |
| P7 | 3,94 | 0,35 | 354 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 4.831 | 33,99 |
| P8 | 2,60 | 0,35 | 358 | 50 | 0,0125 | 0,0486 | 31 | 6.198 | 21,54 |

APÊNDICE D - Modelo de requerimento para instalação do aparato de vela úmida.

REQUERIMENTO PARA INSTALAÇÃO DE APARATO DE VELA ÚMIDA

Ao Sr. (Sra): _____

Eu, solicitante, na qualidade de professora do Curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão e orientadora do **Trabalho de Conclusão de Curso** do discente (matrícula:), intitulado “**Alcance do *spray* marinho na orla de São Luís, Maranhão**”, venho por meio deste solicitar a **instalação de um aparato de vela úmida** para a coleta de íons cloreto existentes na atmosfera e provenientes da maresia. O projeto visa determinar a quantidade de íons cloreto em cada local, associando sua distância em relação ao mar, a intensidade e direção do vento no local e a influência do uso da paisagem e de estruturas no seu entorno.

Nosso experimento consiste na **instalação de oito (8) aparatos** cobrindo os bairros Ponta d'Areia, Calhau, Olho d'Água e Bequimão (Figura 1), sendo desejável que todos os aparatos sejam instalados no mesmo dia e em dois dias seguidos. Nossa programação é que os mesmos possam ser instalados **nos dias e de** . O aparato deverá ser instalado em local de livre circulação dos ventos, sem obstáculos físicos e preferencialmente associado a alguma estrutura alta pré-existente (como telhados ou lajes), por um período mínimo de 30 dias corridos, conforme norma ABNT NBR 6211:2001.

O aparato é composto por uma estrutura de madeira (leve) que protege um recipiente de vidro (*erlenmeyer*) contendo uma solução de glicerol, a qual não acarreta nenhum risco ou perigo à estrutura do teto, ou a qualquer ser vivo. Na extremidade do recipiente terá um tarugo envolvido por uma gaze (Figura 2). Será necessário que haja acesso, diário (se necessário), ao local para averiguação do aparato, tanto devido a sua integridade física, como para a coleta de informações pontuais.

Desde já agradeço a sua atenção e participação neste projeto,

Atenciosamente,

Local, dia - mês - ano.



Figura 1 - Pontos sugeridos para instalação dos aparatos de vela úmida.



Figura 2 - Aparato de vela úmida mostrando a estrutura de madeira e o erlenmeyer.

APÊNDICE E - Modelo de aviso informativo fixado ao suporte.**AVISO**

EQUIPAMENTO DE USO E RESPONSABILIDADE DO LABORATÓRIO DE ESTUDOS E MODELAGEM CLIMÁTICA (LACLIMA) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (UFMA).

NÃO MEXER!

QUALQUER INFORMAÇÃO SOBRE O EQUIPAMENTO ENTRAR EM CONTATO ATRAVÉS DO Nº DE TELEFONE:

Obrigado!

ANEXO - Norma Técnica

A NBR 6211:2001, foi cancelada e substituída pela NBR 6211:2005, sendo revisada no período de 17 de julho de 2025 a 18 de agosto de 2025, incluindo um escopo em inglês e além da determinação de cloretos solúveis em água, como os existentes em atmosferas marinhas, ele passa também a determinar o de ácido clorídrico (HCl), proveniente de atmosferas poluídas.



**ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA
DE NORMAS
TÉCNICAS**

ABNT
Av. Treze de Maio, 13 - 28º andar
20031-901 - Rio de Janeiro - RJ
Tel: + 55 21 3974-2300
Fax: + 55 21 3974-2346
abnt@abnt.org.br
www.abnt.org.br

© ABNT 2001
Todos os direitos reservados

NOV 2001

NBR 6211

Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida

Origem: Projeto NBR 6211:2001
ABNT/CB-43 - Comitê Brasileiro de Corrosão
CE-43:000.01 - Comissão de Estudo de Corrosão Atmosférica
NBR 6211 - Atmospheric corrosion - Determination of the chloride deposition rate in atmosphere by wet candle method
Descriptors: Atmospheric corrosion, Chloride
Esta Norma substitui a NBR 6211:1988
Válida a partir de 31.12.2001

Palavras-chave: Corrosão atmosférica, Cloreto

6 páginas

Sumário
 Prefácio
 1 Objetivo
 2 Referência normativa
 3 Aparelhagem
 4 Método de ensaio
 5 Resultados
 6 ANEXO
 A Figuras

Prefácio

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB) e dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Projetos de Norma Brasileira, elaborados no âmbito dos ABNT/CB e ABNT/ONS, circulam para Consulta Pública entre os associados da ABNT e demais interessados.

Esta Norma contém o anexo A, de caráter normativo.

1 Objetivo

1.1 Esta Norma prescreve o método da vela úmida para a determinação, através de análise química, do teor de cloretos inorgânicos existentes na atmosfera e depositados sobre a superfície de área conhecida, durante um período de tempo especificado.

1.2 O método prescrito nesta Norma aplica-se especificamente à determinação de cloretos solúveis em água, como os existentes em atmosferas marinhas, e de ácido clorídrico (HCl) proveniente de atmosferas poluídas.

2 Referência normativa

A norma relacionada a seguir contém disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para esta Norma. A edição indicada estava em vigor no momento desta publicação. Como toda norma está sujeita a revisão, recomenda-se àqueles que realizam acordos com base nesta que verifiquem a conveniência de se usar a edição mais recente da norma citada a seguir. A ABNT possui a informação das normas em vigor em um dado momento.

ASTM D 512-89:1999 - Standard test methods for chloride ion in water

5.2 O teor de cloretos é determinado pela seguinte equação:

$$\text{Cloreto (mg / (m}^2 \cdot \text{d))} = \frac{2(A - B) \times M \times 35,5 \times V_T}{V_A \times S \times t}$$

onde:

A é o volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico com a alíquota, em mililitros;

B é o volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico com o branco, em mililitros;

M é o concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico, em molaridade;

V_T é o volume total da amostra após a diluição, em mililitros;

V_A é o volume de alíquota, em mililitros;

S é o área da gaze exposta, em metros quadrados;

t é o tempo de exposição, em dias.

/Anexo A

CANCELADA

NORMA
BRASILEIRA

ABNT NBR
6211

Segunda edição
28.08.2025

**Corrosão atmosférica — Determinação de
cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida**

*Atmospheric corrosion — Determination of chlorides in the atmosphere by
the wet candle method*



ICS 77.060



Número de referência
ABNT NBR 6211:2025
6 páginas

© ABNT 2025

ABNT NBR 6211:2025

4.3.3 Determinação do teor de cloretos

4.3.3.1 Tomar uma alíquota que não contenha mais que 20 mg de íon cloreto. Anotar o volume da alíquota (V_a). Diluir a alíquota com água a 50 mL, se necessário.

4.3.3.2 Adicionar de cinco a dez gotas de indicador misto e agitar o recipiente. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração azul-violeta ou vermelha, adicionar HNO_3 0,05 mol/L, gota a gota, até mudar a coloração para amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso. Caso, após a adição do indicador, apareça a coloração amarela ou laranja, adicionar, gota a gota, uma solução de NaOH 0,25 mol/L, até mudança para a cor azul-violeta. Adicionar, então, HNO_3 0,05 mol/L, gota a gota, até a obtenção de coloração amarela, e adicionar 1 mL de ácido em excesso.

4.3.3.3 Titular com solução de nitrato mercúrico 0,0125 mol/L até coloração azul-violeta permanente. Anotar o volume de solução gasto (A), em mililitros. Se o volume da amostra contiver menos que 2,5 mg de íon cloreto, a titulação final tanto da amostra como do branco deverá ser feita utilizando a solução-padrão 0,00705 mol/L de nitrato mercúrico, usando microbureta.

4.3.3.4 Efetuar o ensaio em branco, utilizando a mesma solução-padrão de nitrato mercúrico utilizado para titular a amostra. Anotar o volume de solução gasto (B), em mililitros.

5 Resultados

5.1 Os resultados devem ser expressos em massa de cloreto por unidade de área, e por unidade de tempo, especificando o início e o término do ensaio e o local de exposição.

5.2 O teor de cloretos é determinado pela seguinte equação:

$$\text{Cloreto (mg/(m}^2 \cdot \text{d))} = \frac{2(A - B) \times M \times 35,5 \times V_T}{V_a \times S \times t}$$

onde

A é o volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico com a alíquota, expresso em mililitros (mL);

B é o volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico no ensaio em branco, expresso em mililitros (mL);

M é a concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico, em mol/L;

V_T é o volume total da amostra após a diluição, expresso em mililitros (mL);

V_a é o volume de alíquota, expresso em mililitros (mL);

S é a área da gaze exposta, expressa em metros quadrados (m²);

t é o tempo de exposição, expresso em dias.