

**João Olavo Paim Cypriano**

**CAMPOS DE DUNAS TRANSGRESSIVOS DA REGIÃO DE CABO FRIO, ESTADO DO RIO  
DE JANEIRO: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E RISCOS GEOLÓGICOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Bacharelado em Geologia**

**UFRJ**

**Rio de Janeiro**

**2024**

JOÃO OLAVO PAIM CYPRIANO

CAMPOS DE DUNAS TRANSGRESSIVOS DA REGIÃO DE CABO FRIO, ESTADO DO RIO  
DE JANEIRO: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E RISCOS GEOLÓGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
em Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,  
como requisito necessário à obtenção do grau  
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Titular João Wagner de Alencar Castro, DSc.

UFRJ

Rio de Janeiro

2024

JOÃO OLAVO PAIM CYPRIANO

**CAMPOS DE DUNAS TRANSGRESSIVOS DA REGIÃO DE CABO FRIO, ESTADO DO RIO  
DE JANEIRO: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E RISCOS GEOLÓGICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
em Geologia do Instituto de Geociências,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ,  
como requisito necessário à obtenção do grau  
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Titular João Wagner de Alencar Castro, DSc.

Aprovada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Por: \_\_\_\_\_

Orientador: Prof. Titular João Wagner de Alencar Castro, DSc

---

Caíque Lima Cabral, MSc

---

Prof. Francisco Manoel Wohnrath Tognoli, DSc

UFRJ

Rio de Janeiro

2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

CYPRIANO, João Olavo Paim

Campos de Dunas Transgressivos da Região de Cabo Frio, Estado do Rio de Janeiro: Transporte de Sedimentos e Riscos Geológicos. / João Olavo Paim Cypriano – Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO, 2024. xi, 44p.

Monografia (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2024.

Orientador: João Wagner de Alencar Castro

1. Transporte de Sedimento Eólicos. 2. Soterramento por Sedimentos da Planície Costeira. 3. Risco Geológico. 4. Sensoriamento Remoto. 5. Geoprocessamento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inestimavelmente a todos que contribuíram para a minha formação acadêmica e a execução do presente trabalho, desde familiares aos servidores com quem tive o prazer de cruzar nesta trajetória. Recordarei com muito carinho todos que despertaram em mim o interesse pelas geociências e o infundável conhecimento geológico.

Ao amigo e orientador, Prof. Titular Dr. João Wagner de Alencar Castro. Agradeço a oportunidade, confiança e aprendizados durante os três anos de Iniciação Científica no LAGECOST, proporcionando grande contribuição para minha evolução científica e profissional.

Ao Laboratório de Geologia Costeira, Sedimentologia e Meio Ambiente – LAGECOST, do Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional/UFRJ, pela estrutura e apoio logístico. Agradeço também ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq pelo apoio financeiro através do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC).

Agradeço imensamente a minha família, que me deu base e força para alcançar os meus objetivos, em especial ao meu pai Carlos Alex de Cantuária Cypriano por todo amor e suporte na difíceis decisões durante essa trajetória, a minha irmã Siva Paim Cypriano por me suportar diariamente e eterno companheirismo e a minha mãe Jundiara da Paz Paim que já não está aqui para me ver vencer esta batalha, mas que com certeza está comemorando tanto quanto eu.

Agradeço imensamente a minha companheira Tinae Luisa Deguchi Hayashi por todo amor, suporte e encorajamento neste final da minha trajetória universitária, sem você eu não seria o mesmo.

Aos meus amigos e amigas com quem pude compartilhar muitos conhecimentos, experiências e momentos nesta trajetória, grandes companheiros de campos. Agradeço especialmente a Bernardo Rocha da Costa Leite, Carolina Coelho Giorio do Vale, Tomaz Emrich Pessoa, Davi Cardoso, Elson Albuquerque, João Victor Sampaio, Alessandra Fazzi, Diego Vellasquez, Angela Maria, Daniela Esteves, Gisella Rosa, Marcelle Manhães, David Machado, Marina Moesia e João Pedro Amaral. Aos amigos de longa data, agradeço especialmente a Pedro Rocha, Julia Nano, Rafael Sucupira, Felipe Mazza e Caio Freitas pela eterna amizade e parceria.

Agradeço também a todos os monitores com quem tive oportunidade de compartilhar aprendizados geológicos, em especial à Sofia Goldbach, Amanda Mendes, Bernardo Khater (Dona Bê), Lethicia Ferreira (Lelê), Ursula Riente, e Raphaela De Negri, estes últimos também companheiros do Diretório Acadêmico Joel Valença.

Aos meus colegas de laboratório, que contribuíram inestimavelmente para a minha formação como geólogo. Agradeço a Caíque Lima Cabral, Daniel Fernandes, Ingrid Rayanne Lima da Silveira, Vinícius Sameiro e Willian Cruz Gouveia Junior.

Agradeço ao corpo docente do Departamento de Geologia por todos ensinamentos e campos contribuindo de maneira inestimável à minha formação profissional e conhecimento geológico. Em especial ao professores André Ribeiro, Silvia de Medeiros, Renata Schmitt, Claudio Limeira, Renato Ramos (Casquinha), Katia Mansur e José Carlos Seoane (Cainho).

Agradeço à Marilia e Maria Quintilia por todos os lanches e conversas no café da manhã antes das aulas.

Agradeço também aos melhores motoristas da UFRJ, Wanderley, Eduardo, Damião e Ednaldo, por sempre nos conduzirem com toda a segurança pelas estradas do Brasil a fora

Agradeço também a Anadja Pacheco e Elisabete Costa por todo o suporte nesta trajetória.

A todos que cruzei nesta trajetória, em especial aos inestimáveis servidores da UFRJ indispensáveis para formação profissional no ensino público, meus sinceros agradecimentos.

## Resumo

CYPRIANO, João Olavo Paim. **Campos de Dunas Transgressivos da Região de Cabo Frio, Estado do Rio De Janeiro: Transporte de Sedimentos e Riscos Geológicos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. 44p.

A planície costeira da região de Cabo Frio, caracteriza-se por reduzidos índices pluviométricos e elevadas temperaturas, conferindo-lhe condições climáticas de enclave semiárido em meio ao litoral úmido do estado do Rio de Janeiro. A área investigada destaca-se pela ocorrência de dunas móveis transgressivas, submetidas a regime de vento unimodal. O presente trabalho objetiva estudar a movimentação das formas e feições eólicas sobre áreas urbanas, infraestrutura aeroportuária, recursos hídricos e área de preservação ambiental permanente, tendo em vista problemas relacionados a riscos geológicos de soterramentos. Procedimentos metodológicos, envolveram, análise granulométrica ( $D_{50}$ ) das amostras coletadas no sistema eólico da Mãe e Peró. Em seguida desenvolveu-se modelagem 3D utilizando imagem de satélite CBERS 04 do INPE - Instituto Espacial de Pesquisas Espaciais; Modelo Digital de Elevação - MDE obtido no portal do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Através do software QGIS 3.22, utilizou a composição de bandas R(3) - G(2)-B(1) da câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura - WPM, seguida por posterior fusão com a banda pancromática pela ferramenta *Pansharpening*. A fase final de construção do modelo 3D foi realizada pelo software QGIS, versão 3.22, com exagero vertical de 4x. Resultados obtidos através de análise granulométrica sugerem  $D_{50}$  de 0,161 mm para o campo de dunas de Cabo Frio e  $D_{50}$  de 0,206 mm para as Dunas do Peró. Registrhou-se através desse trabalho processos de soterramentos sobre a planície costeira na ordem de 3,2 m/ano na região do campo de dunas transgressor do Distrito de Peró e 6,1 m/ano na região da duna Mãe na cidade de Cabo Frio. O modelo 3D desenvolvido permitiu espacialização das feições no domínio da planície costeira, delimitando assim áreas de risco geológico submetidas a soterramentos por dunas moveis transgressivas. Verificou-se forte pressão antrópica sobre o processo de soterramento nos dois sistemas sedimentares eólicos investigados.

**Palavras-chave:** Soterramento por Sedimentos da Planície Costeira. Risco Geológico. Geoprocessamento.

## ABSTRACT

CYPRIANO, João Olavo Paim. **Transgressive Dune Fields in The Cabo Frio Region, Rio De Janeiro State: Sediment Transport and Geological Risks.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. 44p.

The coastal plain of the Cabo Frio region is characterized by low precipitation levels and high temperatures, creating a semi-arid climatic enclave amidst the humid coastline of the state of Rio de Janeiro. The investigated area is notable for the occurrence of transgressive mobile dunes, subjected to a unimodal wind regime. This study aims to examine the movement of aeolian features and formations over urban areas, airport infrastructure, water resources, and permanent environmental preservation areas, considering issues related to geological risks of burial. Methodological procedures involved granulometric analysis (D50) of samples collected from the M  e and Per  o aeolian systems. 3D modeling was then developed using CBERS 04 satellite imagery from INPE - National Institute for Space Research; Digital Elevation Model - DEM obtained from the IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics portal. Using QGIS 3.22 software, a composition of R(3) - G(2) - B(1) bands from the multispectral and wide-swath panchromatic camera was followed by subsequent fusion with the panchromatic band using the Pansharpening tool. The final phase of the 3D model construction was carried out with QGIS version 3.22, applying a 4x vertical exaggeration. Results from granulometric analysis indicated a D50 of 0.161 mm for the Cabo Frio dune field and D50 of 0.206 mm for the Per  o Dunes. This study recorded burial processes in the coastal plain at rates of 3.2 m/year in the transgressive dune field of the Per  o District and 6.1 m/year in the M  e dune region in Cabo Frio. The developed 3D model enabled spatial representation of features within the coastal plain domain, thereby delineating areas of geological risk subjected to burial by transgressive mobile dunes. Significant anthropogenic pressure on the burial process was observed in both investigated aeolian sedimentary systems.

**Keywords:** Burial by Coastal Plain Sediments. Geological Risk. Geoprocessing

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Localização das áreas de estudo no contexto do município de Cabo Frio, Região dos Lagos Fluminense/Estado do Rio de Janeiro. Imagem base: CBERS-04A .....	3
<b>Figura 2:</b> Mapa geológico do município de Cabo Frio – Região dos Lagos Fluminense/Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado de Heilbron et al., (2016).....	6
<b>Figura 3:</b> Mapa da Região Hidrográfica VI – Lagos São João. Fonte: Consórcio Intermunicipal Lagos São João, 2024. ....	9
<b>Figura 4:</b> Ponto de coleta das amostras analisadas do sistema eólico da Mãe e do Peró. Imagem base: CBERS-04A.....	15
<b>Figura 5:</b> Distribuição da precipitação média anual e mensal para diferentes períodos de amostragem na região de Cabo Frio/RJ. A: Apresenta a precipitação média mensal entre 1966 e 1983; B: Apresenta a precipitação acumulada anual entre 1966 e 1983; C: Apresenta a precipitação média mensal entre 2007 e 2023, e C: Apresenta a precipitação acumulada anual entre 2007 e 2023. ....	17
<b>Figura 6:</b> Áreas da planície costeira da região do campo de dunas do Peró – Cabo Frio, submetidas a processo de soterramento entre 1976 e 2022. Imagem base de 2022. Fonte da imagem: CBERS-04A.....	19
<b>Figura 7:</b> Áreas da planície costeira da região do campo de dunas da Mãe – Cabo Frio, submetidas a processo de soterramento entre 1976 e 2022. Imagem base de 2022. Fonte da imagem: CBERS-04A.....	21
<b>Figura 8:</b> Imagem do campo de dunas do Peró, obtida através da modelagem tridimensional, submetidas a processos de soterramento entre 1976 e 2022. Cada linha representa uma seção selecionada para o perfil topográfico. <b>A:</b> Seção topográfica Dunas Escalonares; <b>B:</b> Seção topográfica Lagoa do Brejo do Matadouro; e <b>C:</b> Seção Topográfica a Norte da Lagoa. ....	23
<b>Figura 9:</b> Imagem do campo de dunas da Mãe, obtida através da modelagem tridimensional, submetidas a processos de soterramento entre 1976 e 2022. Cada linha representa uma seção selecionada para o perfil topográfico. <b>D:</b> Seção topográfica Setor Sul; <b>E:</b> Seção topográfica Setor Central; e <b>F:</b> Seção Topográfica Setor Norte. ....	25
<b>Figura 10:</b> Mapa de compartimentação geomorfológica do sistema eólico da Mãe, segundo classificação proposta por Castro (2001).....	27
<b>Figura 11:</b> Mapa de compartimentação das feições geomorfológicas do sistema eólico da Duna Mãe.....	29
<b>Figura 12:</b> Mapa de compartimentação geomorfológica do sistema eólico do Peró, segundo classificação proposta por Castro (2001).....	31
<b>Figura 13:</b> Mapa de compartimentação das feições geomorfológicas do sistema eólico das Dunas do Peró, conforme classificação proposta por Castro (2001). .....	33

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Taxa de movimentação média em m/ano dos campos de dunas investigados de 1976 a 2022.....	22
<b>Tabela 2:</b> Área total em m <sup>2</sup> dos dois campos de dunas transgressivos investigados na região de Cabo Frio/RJ entre 1976 e 2022 .....	22
<b>Tabela 3:</b> Estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletada nas dunas frontais do sistema eólico da Mãe .....	34
<b>Tabela 4:</b> Estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletada nas dunas frontais do sistema eólico do Peró. ....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS

- AAS** – Anticiclone Atlântico Sul;
- AP** – Antes do Presente;
- APP** – Área de Preservação Permanente;
- ASAS** – Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul;
- CBERS** – Satélite de Recursos Terrestres China-Brasil;
- CILSJ** – Consórcio Intermunicipal Lagoa São João;
- DRM** – Departamento de Recursos Minerais;
- DTCF** – Domínio Tectônico de Cabo Frio
- FAB** – Força Aérea Brasileira;
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
- IDHM** – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal;
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil;
- INPE** – Instituto de Pesquisas Espaciais;
- MDE** – Modelo Digital de Elevação;
- PDI** – Processamento Digital de Imagens;
- RHLSJ** – Região Hidrográfica Lagos São João;
- RLF** – Região dos Lagos Fluminense;

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>4</b>
<b>3. DIAGNOSTICO AMBIENTAL .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. CONDICIONANTES METEREOLÓGICOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3. CONDICIONANTES OCEANOGRÁFICOS.....</b>	<b>7</b>
<b>3.4. ASPECTOS HIDROGRÁFICOS .....</b>	<b>8</b>
<b>3.5. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS .....</b>	<b>9</b>
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>10</b>
<b>5. MATERIAIS E METÓDOS.....</b>	<b>13</b>
<b>5.1. SUMÁRIO METEREOLÓGICO .....</b>	<b>13</b>
<b>5.2. GEOPROCESSAMENTO .....</b>	<b>13</b>
<b>5.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....</b>	<b>14</b>
<b>6. RESULTADOS.....</b>	<b>16</b>
<b>7. DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
<b>8. CONCLUSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>9. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## INTRODUÇÃO

As dunas costeiras são importantes formas de relevo que ocupam vasta área nos mais diversos domínios morfoclimáticos do mundo. A evolução destas feições e formas ocorre sobre variadas escalas temporais e espaciais (Gao, Kennedy & Konlechner, 2020). Os depósitos eólicos costeiros são entendidos como ambientes sedimentares, moldados pela ação do vento, que ocorrem de forma independente da topografia local (Bagnold, 1933). A formação de dunas costeiras depende de três fatores interrelacionados: disponibilidade de sedimentos soltos, ação do vento com intensidade e direção adequadas para o transporte de sedimentos e existência de uma superfície com dimensões propícias ao desenvolvimento do ambiente eólico (Goldsmith, 1978). Conforme Bagnold (1941), o movimento de sedimentos eólicos se manifesta de acordo com três processos físicos de sedimentação, sendo eles, o rastejamento superficial, a saltação e a suspensão de grãos.

Os processos físicos de sedimentação eólica associados ao desenvolvimento de dunas costeiras podem ser aferidos através de estimativas de taxas de transporte induzidas pelo vento, conforme demonstrado nos trabalhos de Bagnold (1941), Lettau & Lettau (1978), Nickling (1986), Sherman & Hotta (1990), Castro (2005), Hesp (2013), Miguel & Castro (2018), Silveira *et al.* (2021) e Cabral & Castro (2022). Em relação às estimativas de transporte eólico e balanço sedimentar, Werner, Illeberger & Rust. (1988) realizaram os primeiros estudos em dunas na região de Alexandria, costa da África do Sul. Onde as movimentações de dunas transversais foram obtidas através da análise aerofotogramétrica de diferentes datas de voos e pela expressão desenvolvida por Simons *et al.* (1965) para o cálculo de estimativa de taxas de transporte eólico em diversos campo de dunas estudado. Metodologia semelhante foi aplicada por Castro (2005) e Silveira *et al.* (2021) nos campos de dunas do litoral setentrional do Nordeste brasileiro.

De acordo com Fryberger (1979), Castro (2001), Castro *et al.* (2017) e Miguel & Castro (2018), a formação de depósitos eólicos costeiros é dependente da zona de alimentação do sistema (praia), uma vez que os sedimentos retirados do repouso, são retrabalhados e transportados em direção à zona de trânsito, definida como a planície de deflação, e posteriormente depositados, dando origem as feições eólicas. Segundo Castro (2001), a disponibilidade de sedimentos no litoral é controlada por aporte de sedimentos fluviais, depósitos arenosos na plataforma continental interna e o transporte de sedimentos induzidos por ondas e ventos.

O processo de movimentação de dunas e o soterramento da planície costeira são resultados da resposta bio-geomorfológica associada às mudanças do aporte sedimentar, regime de ventos e cobertura vegetal, assim como das atividades antrópicas (Cabral & Castro, 2022). As características climáticas, através das taxas de precipitação, não controlam apenas a migração das feições, mas também o aporte sedimentar aos campos de dunas costeiras através da praia e planície costeira (Castro, 2001). Segundo Castro *et al.*, 2003 os índices pluviométricos

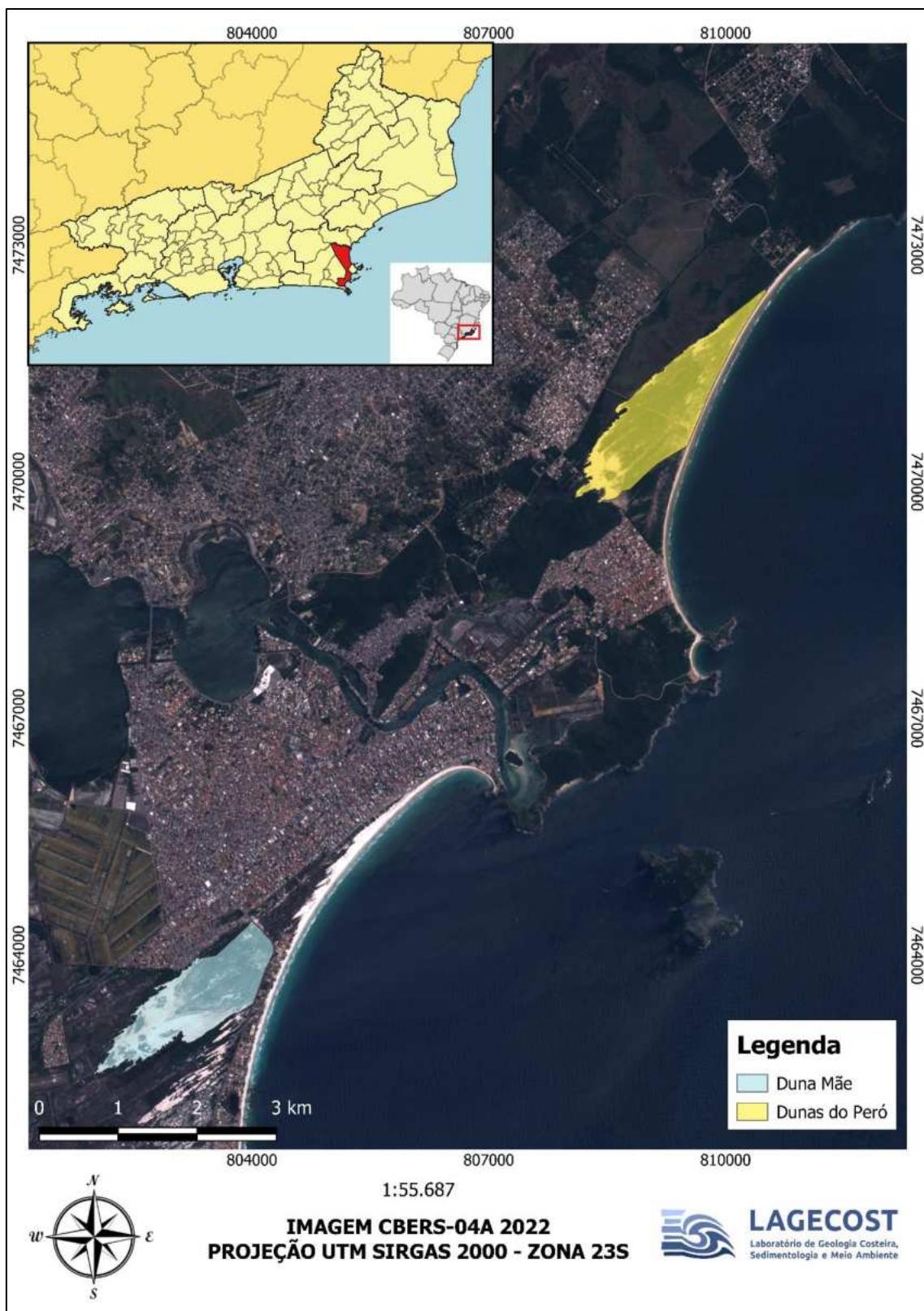
detêm forte influência sobre o processo de transporte eólico e migração de dunas, quanto maiores os índices pluviométricos menor o potencial de transporte eólico.

As estimativas de transporte eólico em dunas costeiras oferecem subsídios valiosos para a gestão sustentável das áreas costeiras. A quantificação do transporte eólico de sedimentos permite identificar áreas com maior risco de erosão e inundações, norteando o planejamento de medidas de proteção costeira e minimizando os impactos ambientais e sociais. Além disso, a compreensão da dinâmica das dunas costeiras é crucial para o manejo sustentável de atividades como turismo, pesca e agricultura em áreas litorâneas, garantindo o equilíbrio entre o desenvolvimento socioeconômico e a preservação ambiental. As dunas costeiras, por sua vez, abrigam uma rica biodiversidade, cujo equilíbrio depende intimamente da dinâmica sedimentar eólica. Estudos envolvendo a estimativa das taxas de transporte eólico contribuem para a melhora e evolução do gerenciamento costeiro. Desta forma, os ecossistemas costeiros podem ser preservados eficazmente, assegurando a preservação da riqueza natural das áreas costeiras.

Depósitos eólicos transgressivos são amplamente distribuídos ao longo da costa brasileira (Castro, 2005; Castro *et al.*, 2017; Cabral & Castro, 2022). A compreensão geral da mobilidade das dunas móveis sobre a planície costeira de retaguarda é fundamental para a gestão dos sistemas eólicos aqui estudados. Objetiva-se estudar a dinâmica do sistema eólico da região de Cabo Frio, quantificando as taxas de movimentação de dunas sobre a planície costeira de retaguarda e determinar áreas de maior risco geológico associado.

### **1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

A região das Dunas do Peró e das Dunas Mãe localizam-se no município de Cabo Frio, Região do Lagos Fluminense, nordeste do Estado do Rio de Janeiro. Estes sistemas eólicos caracterizam-se por um conjunto de formas e feições com extensão em torno de 3,5 km e 3,7 km, respectivamente, no sentido NE-SW, largura aproximada de 1,2 km com 1,9 km<sup>2</sup> e 1,4 km com 1,6km<sup>2</sup>, respectivamente. O sistema eólico do Peró é limitado a leste pela Praia do Peró, a oeste por uma extensa área brejosa e pela estrada do Guriri e ao sul pelo Morro do Piaçava e o Brejo do Matadouro (**Figura 1**). O sistema eólico da Mãe é delimitado a leste pela Praia do Forte, arco praial de Cabo Frio, e Rodovia Estadual General Bruno Martins (RJ-102), a oeste pelo Aeroporto Internacional de Cabo Frio e a Laguna de Araruama, ao norte pela área urbana do bairro de São Cristovão e ao sul por áreas alagadiças para produção de sal de antigas salinas (**Figura 1**).



**Figura 1:** Localização das áreas de estudo no contexto do município de Cabo Frio, Região dos Lagos Fluminense/Estado do Rio de Janeiro. Imagem base: CBERS-04A

## **2. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo quantificar as taxas de movimentação de dunas e identificar aspectos da dinâmica sedimentar da movimentação de dunas em 2 (dois) sistemas eólicos distintos na Região de Cabo Frio – Estado do Rio Janeiro.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Quantificar em escala anual a taxa de movimentação dos depósitos eólicos de Cabo Frio (Duna Mãe);
- Quantificar em escala anual a taxa de movimentação dos depósitos eólicos do Peró, região de Cabo Frio;
- Identificar os compartimentos geomórficos a partir das formas eólicas;

### **2.2. JUSTIFICATIVA**

Na RLF, em especial no município de Cabo Frio, a ocorrência de dunas transgressivas costeiras impõe desafios significativos devido à constante mobilidade dos sedimentos impulsionada pela ação dos ventos e pelas características geomorfológicas e climáticas específicas da região. Essa movimentação de sedimentos tem gerado não apenas alterações na paisagem local, mas também riscos geológicos que afetam infraestruturas, ecossistemas e comunidades.

A escolha do tema se justifica pela necessidade de se aprofundar o conhecimento sobre a dinâmica das dunas transgressivas na região de Cabo Frio, cuja especificidade torna os processos sedimentares eólicos e as influências climáticas especialmente intensas. O estudo da compreensão da dinâmica sedimentar neste local pode trazer *insights* valiosos para o desenvolvimento de estratégias de mitigação dos riscos geológicos, oferecendo bases para práticas de gestão ambiental e planejamento urbano e rodoviário mais eficazes.

Ao investigar o transporte de sedimentos e a dinâmica das dunas transgressivas em Cabo Frio, o presente trabalho visa preencher lacunas existentes na literatura sobre o comportamento desses sistemas em ambientes costeiros brasileiros. Este estudo pretende abordar o mapeamento e monitoramento das dunas, analisando, entre outros fatores, a influência dos ventos e das interações climáticas nos padrões de movimentação das dunas. Com isso, espera-se que os resultados possam contribuir tanto para o avanço do conhecimento científico na área de geomorfologia costeira quanto para a elaboração de estratégias de mitigação de risco geológico. Esse entendimento pode beneficiar diretamente a comunidade acadêmica e os gestores locais, fornecendo subsídios para a criação de políticas públicas que minimizem os danos à infraestrutura e ao meio ambiente.

Portanto, ao explorar as interações entre a dinâmica sedimentar e os riscos geológicos associados, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de um modelo de análise para a região dos Lagos Fluminense.

### **3. DIAGNOSTICO AMBIENTAL**

#### **3.1. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS**

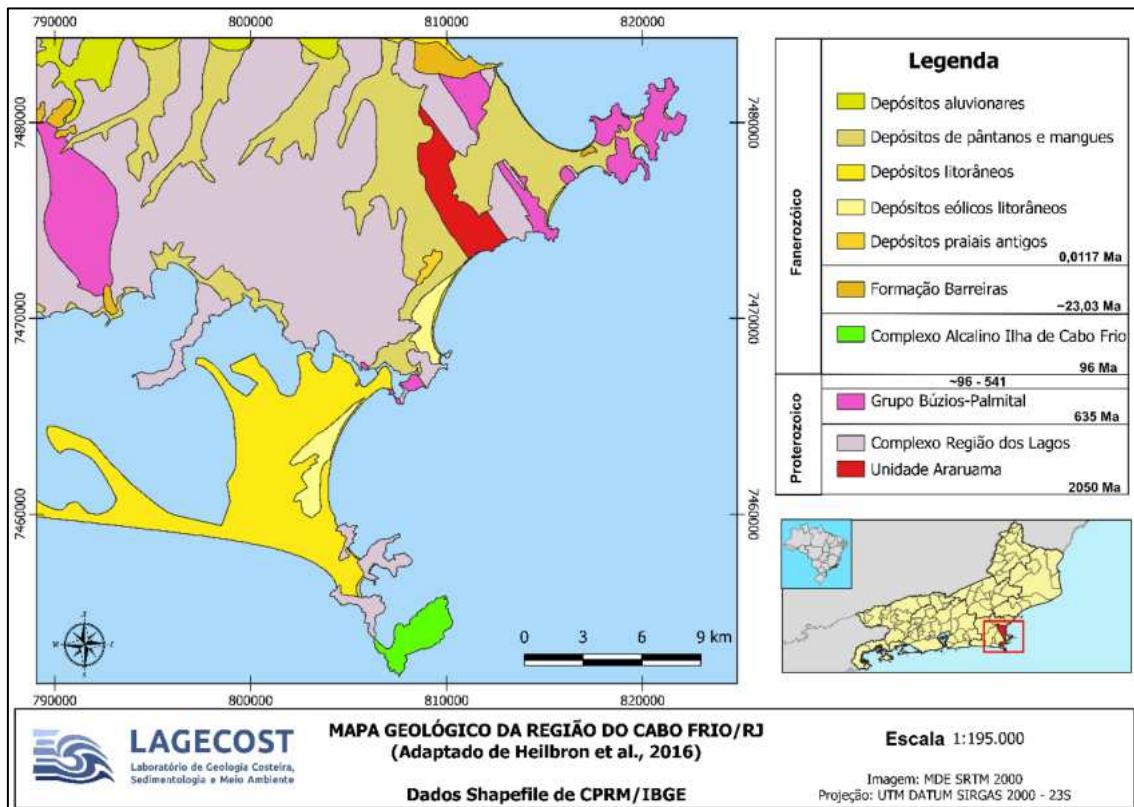
A área de estudo insere-se no contexto do Domínio Tectônico de Cabo Frio (DTCF), segmento central da Faixa Ribeira, terreno geológico acrescionado no Cambriano ao evento denominado Orogênese Búzios, entre 525-520 Ma (Trompette, 1994, Schmitt *et al.*, 2001, 2004; Heibron *et al.*, 2008). Do ponto de vista geomorfológico, a Região do Lagos Fluminense é caracterizada por três domínios litoestratigráficos distintos (Schmitt, 2001). O primeiro é representado por um conjunto de rochas do Proterozóico pertencentes ao domínio tectônico de Cabo Frio, o segundo caracteriza-se por litotipos do Mesozoico caracterizados por magmatismo básico e, o terceiro, por sedimentos quaternários constituídos por depósitos marinhos, fluviomarinhos e eólicos. Segundo Schmitt (2012), entre o Cretáceo Superior e o Eoceno (93-40 Ma), durante o desenvolvimento da margem continental brasileira, pulsos magnáticos alcalinos foram responsáveis pela formação da Ilha de Cabo Frio e do Morro São João (**Figura 2**).

De acordo com Turq *et al.*, (1999), os depósitos costeiros da região são formados por sedimentos de ambientes continentais com origem no Neógeno da Formação Barreiras, além de depósitos fluviais e marinhos associados às variações do nível relativo do mar ocorridas ao longo do Quaternário. Estes depósitos são caracterizados por sedimentos marinhos e continentais de idade pleistocênica e holocênica (Castro *et al.*, 2014). Os sedimentos pleistocênicos caracterizam-se por terraços arenosos de coloração esbranquiçada na superfície e acastanhados em profundidade, geralmente atribuídos à presença de matéria orgânica (Martin, Sugio & Dominguez, 1997). Enquanto os sedimentos holocênicos são caracterizados por terras baixas e pantanosas, datadas em aproximadamente 5.100 anos AP, em geral, constituídos por material siltoso e arenoso, rico em matéria orgânica (Castro *et al.*, 2009). Registra-se também a ocorrência de grande volume de conchas de moluscos típicas de ambientes paleolagunares (Cabral, Castro & Cunha, 2018).

Segundo Rangel (2005), a formação dos ambientes de sedimentação costeira, como as Dunas do Peró e da Mãe, ocorreu devido a sucessão de eventos geológicos significativos durante o Holoceno, principalmente os relacionados às variações do nível do mar. O transporte de sedimentos a partir da geração de ondas resulta na fuga de grãos da faixa de praia para o campo de dunas causando a regressão da linha de costa e expansão dos campos de dunas. Os sedimentos são retrabalhados pelos ventos predominantemente de nordeste até a deposição e formação das feições eólicas.

As dunas costeiras da região de Cabo Frio constituem o mais importante registro eólico ativo do Sudeste brasileiro (Castro *et al.*, 2003). De acordo com Castro (2006), a velocidade média do vento na região das dunas obliquas é de aproximadamente 6 m/s e o regime pluviométrico caracteriza-se por chuvas de verão e chuvas irregulares no inverno. Dessa maneira, durante o verão o volume de sedimentos transportados pelo ventos de nordeste é

inferior aos volumes transportados durante o inverno, uma vez que os sedimentos levam em torno de 5 dias para secar e retomar o transporte após uma precipitação pluviométrica de 40 mm (Silveira *et al.*, 2021), já que a tensão superficial da água dificulta, ou até impede, a mobilidade dos campos de dunas. Tais características possibilitaram a formação dos campos de dunas da Região do Lagos Fluminense (Castro *et al.*, 2003).



**Figura 2:** Mapa geológico do município de Cabo Frio – Região dos Lagos Fluminense/Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado de Heilbron *et al.*, (2016).

### 3.2. CONDICIONANTES METEOREOLÓGICOS

A área de estudo caracteriza-se por um clima distinto do restante do litoral do Sudeste brasileiro. Pode ser descrita como um enclave semiárido quente, similar ao Nordeste do Brasil, devido à baixa pluviosidade, constância dos ventos e alta evaporação (Silva, 2009). A região apresenta índices pluviométricos baixos, entre 750 e 855 mm/ano e altas taxas de evaporação, entre 1.200 e 1.400 mm/ano, temperatura média superior a 21°C entre junho e setembro e entre 23°C e 25°C de novembro a abril, apresentando baixa amplitude térmica anual. A insolação varia entre 200 e 240 h/mês, exceto entre setembro e novembro, quando varia de 150 a 190 h/mês (Coe & Carvalho, 2013). Tal condição climática é resultante da interação de fatores como a ressurgência costeira e ausência de efeito orográfico (Bohrer *et al.*, 2009).

Coe & Carvalho (2013) discutem os dados meteorológicos, como insolação e temperatura média, obtidos na estação Álcalis em Cabo Frio e apontam que os valores obtidos na RLF são valores semelhantes a dados obtidos em regiões da caatinga na região Nordeste do Brasil e que podem estar associados à umidade relativa do ar e à frequência de cobertura de nuvens. Os maiores valores para distribuição média do número de horas de insolação são no período de verão, enquanto no inverno estes valores são semelhantes ao outono. Contudo, a primavera apresenta os menores valores, que tem relação direta com maior índice de cobertura do céu, associados a maior constância e altura das chuvas na primavera (Barbiere, 1997).

Barbiere (1997) aponta que a umidade relativa média na região é de 81%, não ultrapassando 85%, com média em torno de 83% para o verão-primavera e 82% no outono-inverno, enquanto a evapotranspiração apresenta os maiores valores no meses de inverno e menores valores nos meses outono.

O regime de ventos predominante de nordeste sopra sobre a zona de alimentação do sistema eólico (praia) para, em seguida, transportar o material sedimentar em direção aos campos de dunas de retaguarda que se encontram sobre a planície costeira da região. Caracteriza-se por alta frequência e intensidade média de 5,0 m/s, ocorrendo durante todo o ano, com maior incidência entre janeiro e agosto e menor entre abril e maio (Castro *et al.*, 2003; Silveira *et al.*, 2021). O responsável pela geração de ventos nordeste atuantes durante a maior parte do ano e entradas de sistemas frontais durante o inverno é o resultado da atuação do ASAS (anticiclone subtropical Atlântico Sul), responsável pela geração de ventos de nordeste durante maior parte do ano e entradas de sistemas frontais durante meses de inverno (Reboita; Ambrizzi & Rocha, 2009).

### 3.3. CONDICIONANTES OCEANOGRÁFICOS

Trabalhos desenvolvidos na bacia de Campos, definem o clima de ondas como predominante de tempo bom, com ondulações variando no quadrante nordeste e ocorrência de marulhos (*swell*) provenientes de anticíclopes do Atlântico Sul (AAS), associados aos sistemas frontais e frentes frias, com direção leste-sudeste (Pinho, 2003; Savi, 2007; Castro, 2018; Fernandes & Castro, 2020). De acordo com trabalhos desenvolvidos por Pinho (2003) sugere-se que o estado de mar com maior probabilidade de ocorrência é caracterizado por ondas com período significativo entre 2,5m e 3,5m. Os sistemas frontais alteram as condições meteorológicas na região, influenciando diretamente as forçantes marinhas e o transporte de sedimentos induzido por ondas (Fernandes & Castro, 2024).

Savi (2007) caracteriza o regime de maré da RLF como assimétrico e semidiurna. De acordo com a Estação Maregráfica de Arraial do Cabo, o regime de maré na área investigada é do tipo semidiurna, atingindo nível médio de 0,66 m. As preamares inferiores e superiores apresentam médias de 1,13 e 1,21 m, respectivamente, enquanto a baixa-mares inferiores e superiores apresentam valores 0,6 e 0,25 cm (Fernandes & Castro, 2024). A

ressurgência costeira que ocorre no litoral de Cabo Frio é um fator responsável pelo microclima semiárido local. O funcionamento dessa ressurgência é controlado pelo regime dos ventos, ativada pelos ventos de NE, desaparecendo com ventos do sul, associada à passagem das frentes frias (Areias, et al., 2020). Os ventos de NE são mais frequentes na primavera e no verão. Em consequência, as águas oceânicas de superfície ficam frias durante esse período do ano, reduzindo as chuvas.

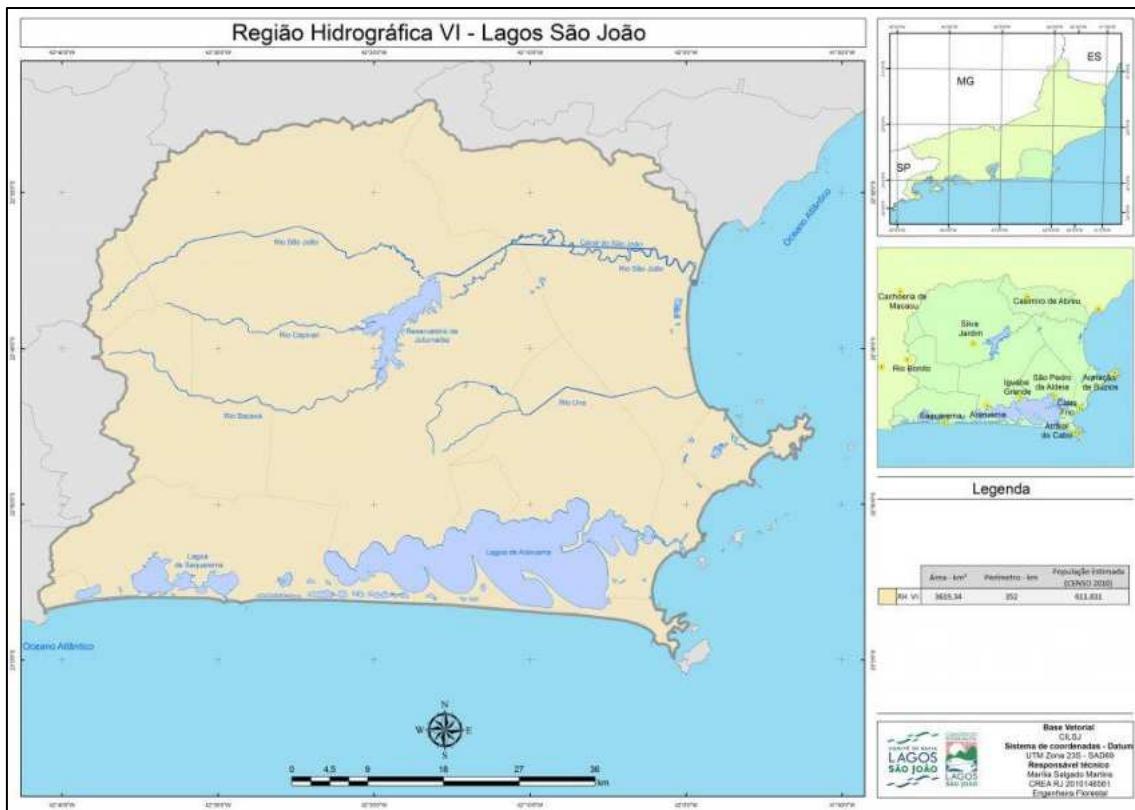
O fenômeno da ressurgência é caracterizado pelo afloramento de águas profundas e frias em determinadas regiões do oceanos (Leite et al., 2006). A ocorrência da ressurgência costeira na região de Cabo Frio é devida a morfologia da costa, a direção predominante de vento do quadrante nordeste e a convergência das forças geradas pela Corrente do Brasil e do Efeito de Coriolis (Valentim, 1984).

### **3.4. ASPECTOS HIDROGRÁFICOS**

As áreas de estudo, segundo o Comitê de Bacia Lagos São João, estão inseridas na Região Hidrográfica Lagos São João (RHLSJ) que abrange partes dos municípios de São Pedro da Aldeia, Cabo Frio, Armação dos Búzios, Araruama e Iguaba Grande cobrindo superfície aproximada de 572 km<sup>2</sup>. A RHLSJ é limitada a oeste com as bacias das lagoas de Jacarepiá e Saquarema, ao norte e noroeste com as bacias dos rios São João e Una e a leste e sul pelo Oceano Atlântico, conforme apresentado na **Figura 3**.

Na RHLSJ situam-se centenas de rios, riachos e córregos perenes e intermitentes, sendo os principais: rios São João, Bacaxá, Capivari, Una, das Ostras, das Moças, Mataruna, Roncador. Também conta com 38 lagoas, sendo uma extinta – lagoa de Juturnáiba – que atualmente é uma represa e principal fonte de água para abastecimento humano (CILSJ, 2003).

A região conta com notável diversidade climática, variando do regime tropical ao semiárido, exibindo forte variação espacial e temporal no que tange a distribuição pluviométrica, exibindo acréscimo na pluviosidade total de sudeste para noroeste.



**Figura 3:** Mapa da Região Hidrográfica VI – Lagos São João. Fonte: Consórcio Intermunicipal Lagos São João, 2024.

### 3.5. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A região de Cabo Frio, segundo dados de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), concentra uma população de 222.161 pessoas, com taxa de escolarização de 6 a 14 anos de idade de 96,9%, em uma área de 413.449 km<sup>2</sup> com densidade demográfica de 537,34 habitantes/km<sup>2</sup>. Dados do IBGE indicam que o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) é 0,735, considerado como desenvolvimento médio, com PIB per capita de R\$ 52.801,54. O município apresenta área urbanizada de 61,44 km<sup>2</sup>, com esgotamento sanitário em 82,3% das moradias, 68,7% das vias públicas urbanizadas e arborização em 61,5% das vias públicas. Sobre saúde, o município apresenta baixa mortalidade infantil, 10,47 óbitos por mil nascidos vivos, e 5,9 internações por diarreia por 100 mil habitantes.

#### **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Bagnold (1933) define uma duna como uma acumulação de areia móvel que existe de forma independente, sem depender da topografia do terreno ou de obstáculos fixos. Conjuntos de dunas são chamados de complexos de dunas. Em sua obra "The Physics of Blown Sand and Desert Dunes" (1941), Bagnold explora o papel do movimento de sedimentos em três formas: suspensão, saltação e rastreamento superficial. Essas categorias foram estabelecidas através de experimentos com a velocidade e direção do vento, permitindo identificar a trajetória dos grãos de areia. Nesses experimentos, observou-se que a subida inicial do grão após o impacto é quase vertical, enquanto a fase final da trajetória é longa e achatada, formando um ângulo de 3° a 10° com a superfície.

Finkel (1959), ao analisar a morfologia de dunas barcanas com alturas de 1 a 6 metros, identificou uma forte correlação linear entre a altura da face de deslizamento da baranca ( $h$ ) e a distância entre seus braços ( $w$ ). Em 1962, Parker Gay Jr. estudou a distribuição e evolução das dunas na área de Yauca a Palpa, no litoral peruano, e foi o primeiro a quantificar o movimento das dunas em um raio de 80 km. Ele utilizou fotografias aéreas em escala aproximada de 1:30.000, registradas em diferentes datas, como referência.

Segundo Kukal (1971), o tamanho médio das areias eólicas varia de 0,15 a 0,25 mm, com um índice de seleção ( $S_o$ ) de Trask inferior a 1,25. Normalmente, as areias são unimodais, mas podem apresentar características bimodais. Grãos entre 0,5 e 1,0 mm tendem a ser bem arredondados e, frequentemente, possuem uma aparência fosca, característica das areias eólicas.

Goldsmith (1978) determina que a presença de ambientes eólicos costeiros depende de três fatores: a disponibilidade de sedimento solto, a ação de ventos com intensidade e duração suficientes para removê-lo e transportá-lo, e uma superfície adequada para o desenvolvimento do ambiente morfológico. Essas condições geralmente ocorrem em climas secos, tanto quentes quanto frios, incluindo áreas como planícies costeiras, planícies de inundação, linha de praia, deltas e desertos.

A classificação de dunas costeiras é abordada por diferentes autores que contribuem com enfoques específicos ao tema. Shepard (1976) introduz uma classificação detalhada dos tipos de costa, definindo as dunas como costa de sedimentação subaérea em ambientes eólicos, enquanto promontórios são costas de sedimentação marinha. Goldsmith (1977), por sua vez, categoriza as dunas costeiras em quatro tipos principais (VAMP): dunas vegetadas, artificialmente induzidas, montes de areia e dunas parabólicas, com foco na diversidade estrutural e funcional das formações. McKee (1979) traz uma classificação universalmente adotada baseada em características morfológicas e na estrutura interna dos depósitos arenosos, ampliando a aplicabilidade da tipologia em diferentes contextos. Davies (1980) propõe uma classificação morfogenética, distinguindo entre dunas vegetadas e cordões

transversais, sublinhando a relação entre a morfologia e os processos formativos. Tsoar e Mollen (1986) destacam a influência da vegetação nas dunas lineares do deserto do Negev, propondo três tipos distintos de dunas lineares. Alcântara-Carrió & Alonso (2000), por fim, oferecem uma abordagem multiescalar para o estudo de ambientes eólicos, abrangendo desde aspectos texturais e processos de sedimentação até a comparação global de diferentes ambientes eólicos, integrando fatores climáticos e antrópicos. Essas contribuições, cada uma com sua particularidade, complementam-se na busca por uma classificação abrangente e contextualizada das dunas costeiras.

Castro (2001) identificou quatro gerações de dunas com idades distintas no litoral setentrional do nordeste brasileiro. A primeira geração, a mais antiga, é chamada de paleodunas e se assenta sobre a Formação Barreiras. A segunda geração inclui feições longitudinais paralelas, sugerindo variações no nível do mar durante o Holoceno. A terceira é formada por eolianitos (dunas piramidais) orientadas nordeste-sudoeste, oblíquas à linha de costa, enquanto a última geração corresponde ao sistema atual de dunas móveis transversais.

Em 2005, Castro realizou o primeiro estudo sobre os processos de soterramento de dunas no litoral brasileiro. Usando fotografias aéreas de diferentes datas e monitorando o movimento das dunas em campo, ele conseguiu estimar a taxa de movimentação das dunas e a área de soterramento. Esse trabalho, conduzido na região de Paracuru, permitiu estimar o soterramento de recursos hídricos e áreas agrícolas locais.

Castro *et al.* (2017) realizaram um estudo sobre a idade das dunas no litoral nordestino brasileiro. Esses depósitos eólicos têm potencial para fornecer informações sobre paleoclima, paleoeventos e a resposta dos ventos regionais às variações no nível do mar durante o Holoceno. O estudo incluiu análises litoestratigráficas e de microfósseis (foraminíferos) para reconstruir as dunas costeiras dos últimos 3.000 anos. Datações por radiocarbono indicaram que os eolianitos têm idades entre 2760 a 2480 e 980 a 750 anos antes do presente, sugerindo que os campos de dunas móveis transversais atuais se formaram após esse período, sob condições similares às do nível do mar atual.

Também em 2017, Cunha, *et al.* investigaram as variações do nível relativo do mar durante o Holoceno na bacia do rio Una, em Cabo Frio/RJ e determinaram, com base em análises sedimentológicas, faciológicas e geocronológicas, que o pico da transgressão holocênica ocorreu entre 6.335 e 4.800 ANO AP e que a Formação Barreiras e cordões litorâneos estabeleceram o controle geomorfológico que influenciou nas variações ambientais e sedimentares, permitindo a compreensão da evolução da linha de costa.

Cabral *et al.*, (2018) examinaram as variações do nível relativo do mar na península de Armação dos Búzios/RJ durante o Holoceno e, através da identificação e análise de camadas bioclásticas compostas por conchas em posição de vida, identificaram processos de transgressão marinha na região entre 5.470 e 5.910 anos AP. Em seguida, ocorreu o

significativo rebaixamento do nível do mar, possibilitando assim, a formação de uma planície costeira, ocupada atualmente, por cordões litorâneos, pântanos, lagunas e dunas costeiras transgressivas, entre estas, as dunas do Peró e da Mãe.

## **5. MATERIAIS E METÓDOS**

Os procedimentos metodológicos consistem no emprego de geotecnologias na elaboração e desenvolvimento de pesquisa na área de geociências (Cabral, 2024). Através de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento foram analisados 3 cenários no intervalo entre 1976 e 2022, envolvendo os períodos de 1976 e 2005, 2005 e 2022 e 1976 e 2022. Elaborou-se um modelo tridimensional para cada campo de dunas investigado. Adicionalmente, foram realizadas análises meteorológicas e granulométricas de amostras coletadas durante o trabalho de campo.

Através da plataforma digital do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais ([INPE], 2023), foi obtido uma imagem multiespectral com resolução espacial de 8 m e uma imagem pancromática com resolução espacial de 2 m do satélite CBERS-04A. Utilizou-se também uma imagem de satélite obtida junto ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e aerofotografias realizadas pela FAB (Força Aérea Brasileira) obtidas junto ao DRM (Departamento de Recursos Minerais). Ademais, foram obtidos Modelos Digitais de Elevação (MDE) através do catálogo do IBGE com resolução espacial de 20 m para elaboração de modelo tridimensional dos campos de dunas.

### **5.1. SUMÁRIO METEOROLÓGICO**

Os dados meteorológicos foram obtidos através do portal do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil ([INMET], 2023) em duas séries temporais distintas. A estação meteorológica Álcalis (83719), descontinuada, apresenta maior intervalo temporal em relação a outra estação analisada, e se localiza entre os dois campos de dunas investigados, com coordenadas geográficas 22°52'58.8"S - 42°01'58.8"W (Coe & Carvalho, 2013). A segunda estação consultada corresponde a nova estação automática de Arraial do Cabo (A606), com coordenadas geográficas 22°58'31.72"S - 42°1'17.36"W. Os dados meteorológicos foram organizados e apresentados de forma sistemática em gráficos de distribuição das normais mensais e diárias. Previamente a etapa de tratamento estatístico e elaboração de gráficos, os dados passaram por uma etapa de Controle e Garantia da Qualidade (QAQC) onde foram desconsiderados os meses e/ou anos que apresentaram mais de 50% de informações nulas.

### **5.2. GEOPROCESSAMENTO**

As imagens de satélite e aerofotografias foram georreferenciadas pela técnica de interpolação baseado no vizinho mais próximo, que apresentou erro quadrático médio inferior a 1 metro. Através do software QGIS, versão 3.22, as imagens foram importadas, considerando a projeção UTM zona 23S e o referencial SIRGAS 2000. Durante as etapas do Processamento Digital de Imagens (PDI) realizou-se as composições em cor verdadeira das bandas espectrais, com objetivo de colorir a faixa pancromática utilizando a ferramenta *Pansharpening* do software QGIS 3.22.

Após o PDI, foi realizada a delimitação dos compartimentos geomorfológicos e identificação do posicionamento das frentes de dunas entre os anos de 1976 e 2022. Para o cálculo das taxas de movimentação de dunas, em m/ano, foram selecionadas cinco frentes de dunas obliquas à linha de costa para os campo de dunas investigados, denominadas de “A”, “B”, “C”, “D”, “E”.

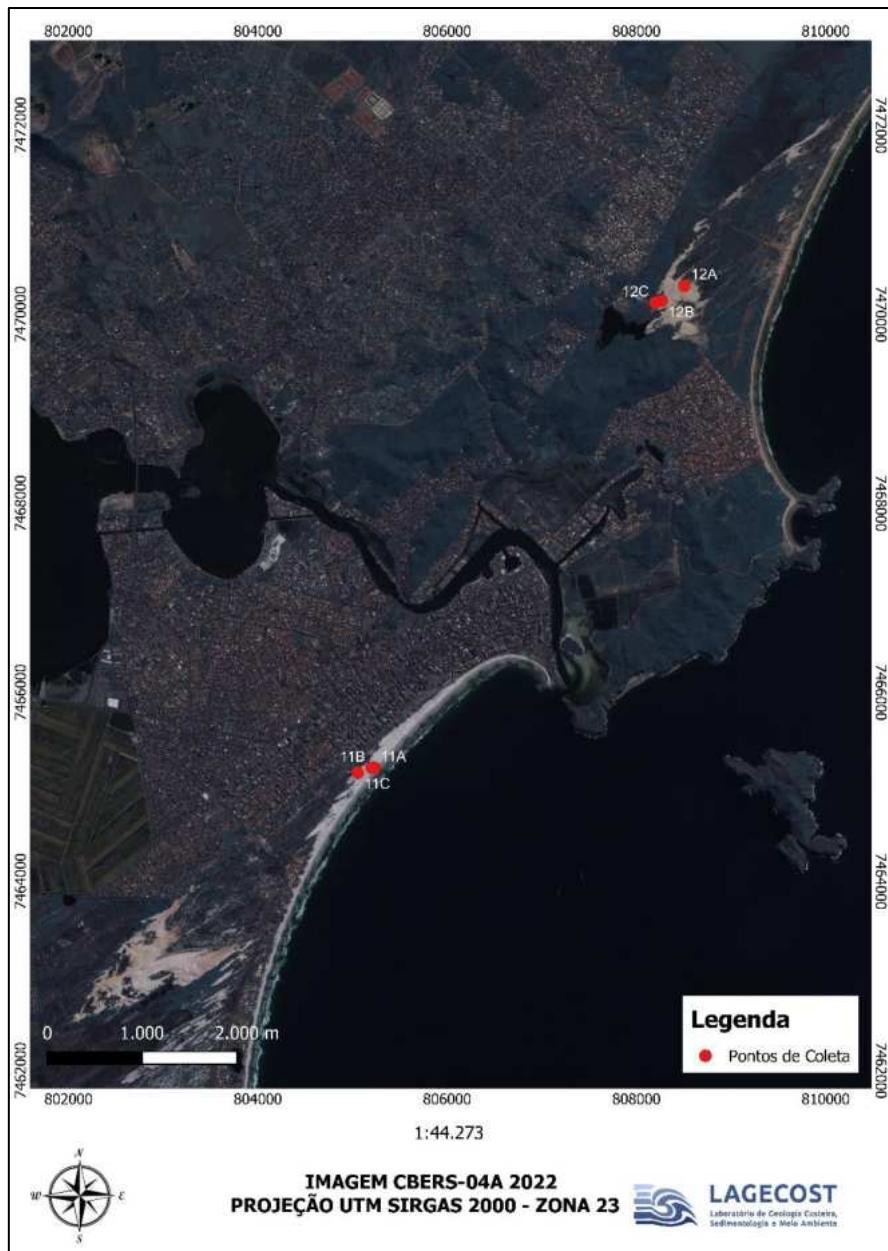
Além da elaboração de *shapefiles* para delimitação das áreas dos campos de dunas, foi elaborado um modelo tridimensional para cada campo de dunas investigado a partir do MDE obtido junto ao IBGE com resolução espacial de 20 m. O exagero vertical aplicado nos modelos tridimensionais foi de 4x para evidenciar melhor a topografia local.

### 5.3. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Para a análise granulométrica das seis amostras coletadas nos campos de dunas investigados, foram adotadas diversas etapas para determinação das características dos grãos analisados em laboratório. As amostras foram processadas pelo Laboratório de Geologia Sedimentar (LAGESED) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), divididas em 11 etapas, desde a preparação e remoção de partículas de matéria orgânica até o peneiramento, para obtenção dos resultados apresentados no presente trabalho. São elas:

1. Remoção de sais solúveis em bêquer utilizando água destilada;
2. Secagem da amostra em estufa;
3. Pesagem da amostra;
4. Eliminação da matéria orgânica utilizando peróxido de hidrogênio;
5. Secagem da amostra em estufa;
6. Pesagem da amostra;
7. Eliminação de materiais carbonáticos utilizando ácido clorídrico;
8. Secagem da amostra em estufa;
9. Pesagem da amostra;
10. Peneiramento em vibrador elétrico utilizando jogo de peneiras (2,83; 2; 1,41; 1; 0,71; 0,5; 0,35; 0,25; 0,177; 0,125; 0,088; 0,062 mm);
11. Pesagem das frações retidas no jogo de peneiras.

A **Figura 4** apresenta a localização das amostras coletadas no contexto dos sistemas eólicos do Peró e da Mãe na Região de Cabo Frio – RJ.

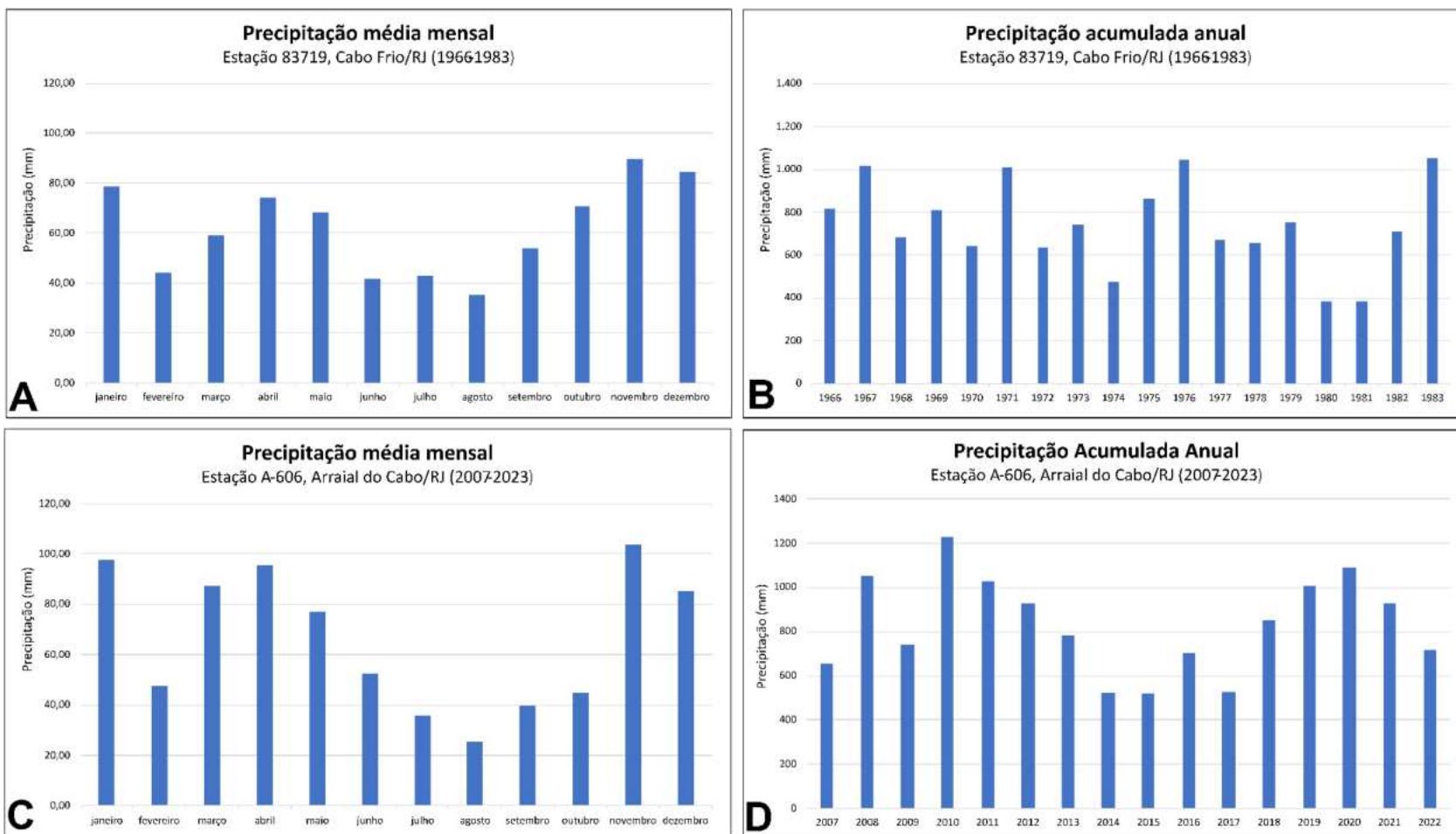


**Figura 4:** Ponto de coleta das amostras analisadas do sistema eólico da Mãe e do Peró. Imagem base: CBERS-04A

## 6. RESULTADOS

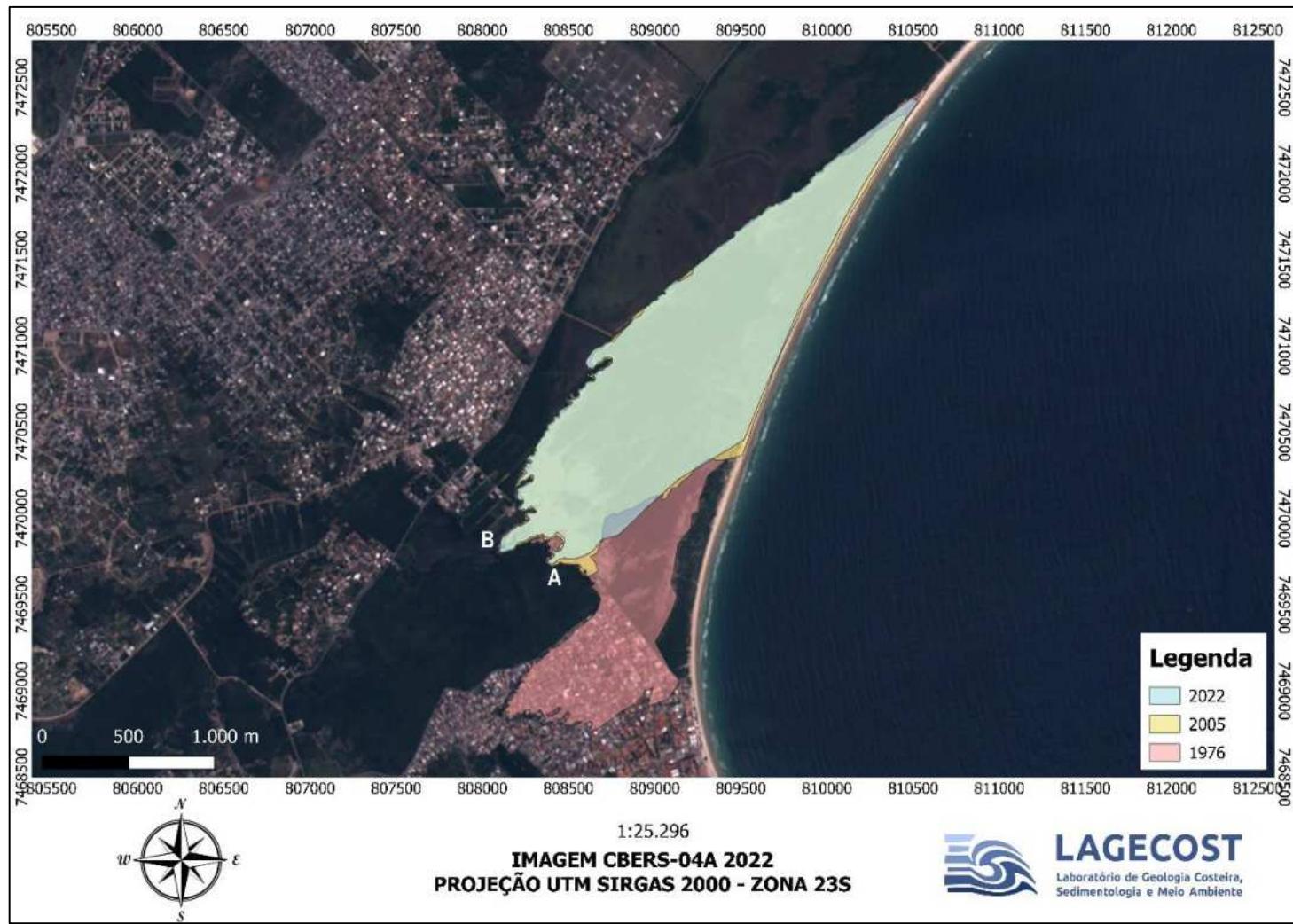
A somatória de fatores, como a variação do nível relativo do mar, a ressurgência costeira resultando em um clima semiárido com baixa pluviosidade e alta taxa de evapotranspiração, incidência de ventos de nordeste com alta frequência e intensidade média, permitiram a formação dos depósitos eólicos da região de Cabo Frio – RJ. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os trabalhos realizados na área.

A **Figura 5** apresenta os gráficos de precipitação pluviométrica: (A) precipitação média mensal entre 1966 e 1983; (B) precipitação acumulada anual entre 1966 e 1983; (C) precipitação média mensal entre 2007 e 2023; e (D) precipitação acumulada anual entre 2007 e 2023. As variações pluviométricas apresentam um padrão de comportamento senoidal, com intervalos de maior pluviosidade entre 2007-2010 e 2017-2020, ultrapassando os dados históricos entre 1966 e 1983 – que não apresentam índices superiores a 1.100 mm –, e de menores índices entre 2011-2014 e 2021-2023. As médias mensais de precipitação ultrapassaram a marca de 100 mm apenas para o mês de novembro entre 2007 e 2023. Importante ressaltar que há uma limitação para os dados da estação automática de Arraial do Cabo (A606), uma vez que em diversos meses a estação reporta dados nulo, podendo interferir nos valores obtidos na análise meteorológica.



**Figura 5:** Distribuição da precipitação média anual e mensal para diferentes períodos de amostragem na região de Cabo Frio/RJ. A: Apresenta a precipitação média mensal entre 1966 e 1983; B: Apresenta a precipitação acumulada anual entre 1966 e 1983; C: Apresenta a precipitação média mensal entre 2007 e 2023, e D: Apresenta a precipitação acumulada anual entre 2007 e 2023.

Através da análise de imagens de diferentes anos entre 1976 e 2022 foi possível identificar o avanço do campo de dunas obliquas transgressivas sobre recursos hídricos superficiais, infraestrutura urbana e aeroportuária e frente montanhosas dos maciços costeiros. Durante o intervalo investigado entre 1976 – 2022, foram selecionados dois setores distintos para o campo de dunas do Peró e três setores distintos para o campo de dunas da Mãe. As frentes de dunas móveis movimentam-se sobre a planície costeira da região com a taxa média de 0,4 m/ano na seção “A” e 3,2 m/ano na seção “B” para o campo de dunas do Peró. A estimativa da área soterrada por urbanização, no período, é de, aproximadamente, 665.000 m<sup>2</sup>, evidenciando a redução de 25% da área total do campo de dunas apresentado na **Figura 6**.



**Figura 6:** Áreas da planície costeira da região do campo de dunas do Peró – Cabo Frio, submetidas a processo de soterramento entre 1976 e 2022. Imagem base de 2022. Fonte da imagem: CBERS-04A.

No campo de dunas da Mãe, a taxa média de movimentação das frentes eólicas obtida foi na ordem de: 6,1 m/ano na seção “C”, 3,4 m/ano na seção “D” e 1,1 m/ano na seção “E”. O total de área soterrada decorrente da movimentação de sedimentos eólicos entre o período analisado foi de aproximadamente, 28.000 m<sup>2</sup>, evidenciando o aumento de 1,7% em relação à área total do campo de dunas no ano de 1976, conforme apresentado na **Figura 7**.



**Figura 7:** Áreas da planície costeira da região do campo de dunas da Mãe – Cabo Frio, submetidas a processo de soterramento entre 1976 e 2022. Imagem base de 2022. Fonte da imagem: CBERS-04A.

A **Tabela 1** apresenta as taxas de movimentação média de sedimentos eólicos para cada frente de duna investigada, conforme intervalos entre 1976 e 2022.

Localização	Frente de duna	Taxa de movimentação média (m/ano)		
		1976 - 2005	2005 - 2022	1976 - 2022
<b>Duna do Peró</b>	Setor A	2,9	3,4	3,17
	Setor B	0,56	0,58	0,44
<b>Duna Mãe</b>	Setor C	5,3	7,41	6,1
	Setor D	5,4	0,5	3,4
	Setor E	2,2	1	1,1

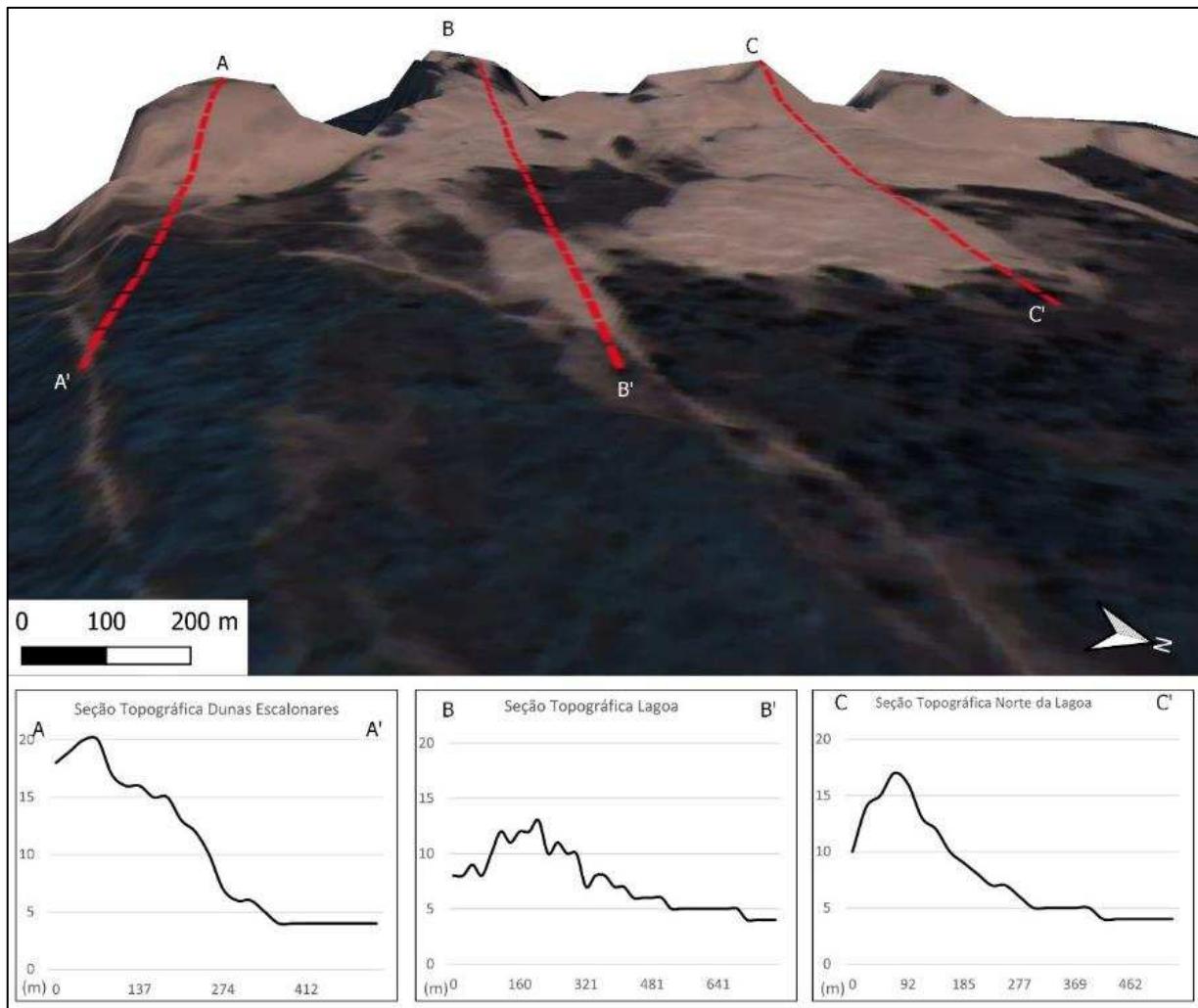
**Tabela 1:** Taxa de movimentação média em m/ano dos campos de dunas investigados de 1976 a 2022.

A **Tabela 2** apresenta a variação da área total dos campos de dunas investigados entre o intervalo (1976-2005, 2005-1976 e 1976-2022).

Ano/Intervalo	Duna do Peró			Duna Mãe		
	Área Total (m <sup>2</sup> )	Variação (m <sup>2</sup> )	Variação (%)	Área Total (m <sup>2</sup> )	Variação (m <sup>2</sup> )	Variação (%)
<b>1976</b>	2.592.088	-	-	1.617.678	-	-
<b>2005</b>	1.883.650	-	-	1.665.652	-	-
<b>2022</b>	1.926.519	-	-	1.645.630	-	-
<b>1976 - 2005</b>	-	-708.438	-27,3%	-	47.974	3,0%
<b>2005 - 2022</b>	-	42.869	2,3%	-	-20.022	-1,2%
<b>1976 - 2022</b>	-	-665.569	-25,7%	-	27.951	1,7%

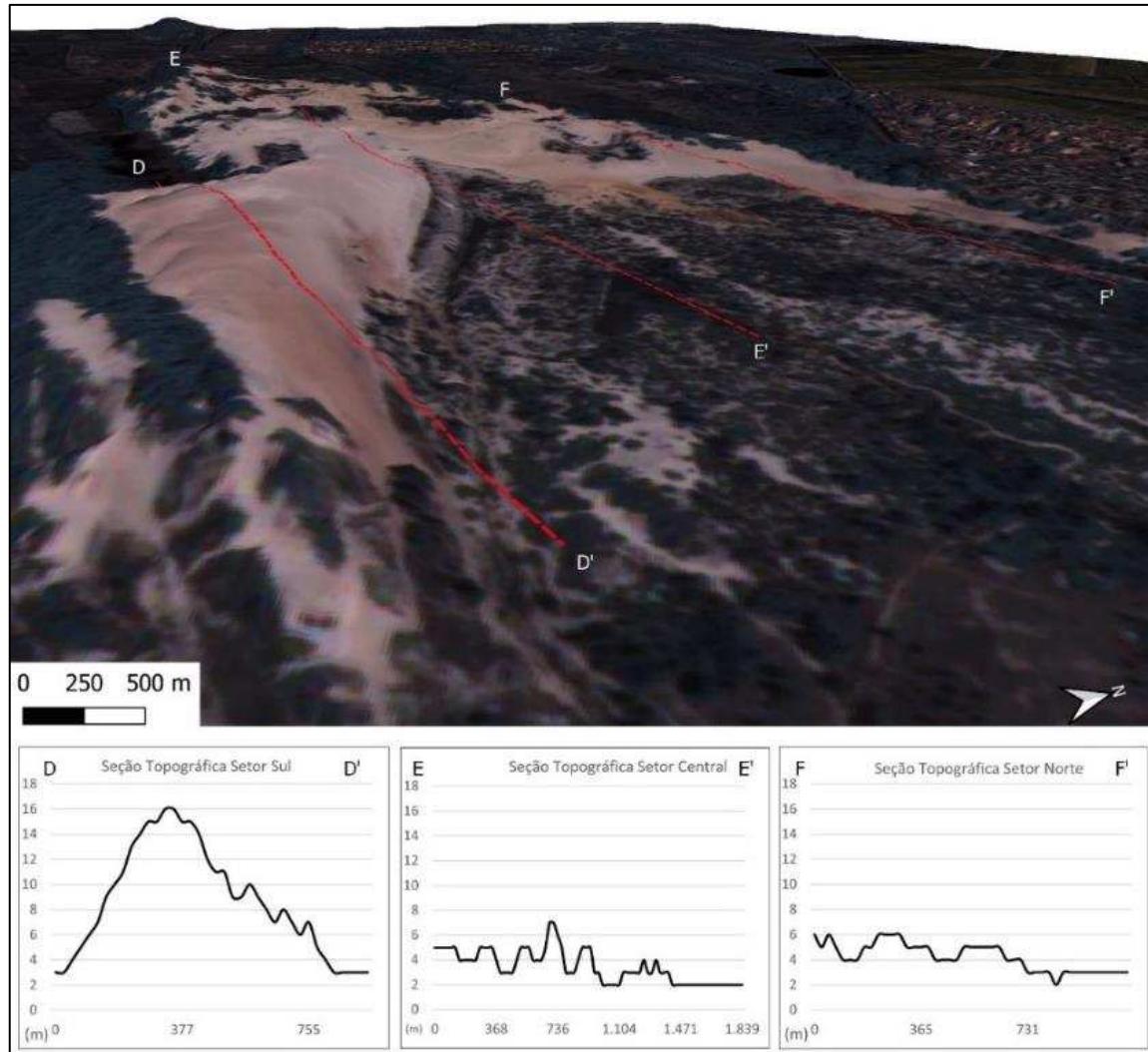
**Tabela 2:** Área total em m<sup>2</sup> dos dois campos de dunas transgressivos investigados na região de Cabo Frio/RJ entre 1976 e 2022.

A partir da elaboração do modelo tridimensional dos campos de dunas investigados foi possível determinar o perfil topográfico dos depósitos eólicos costeiros da praia do Peró. A **Figura 8** apresenta o modelo tridimensional e os perfis topográficos do campo de dunas do Peró.



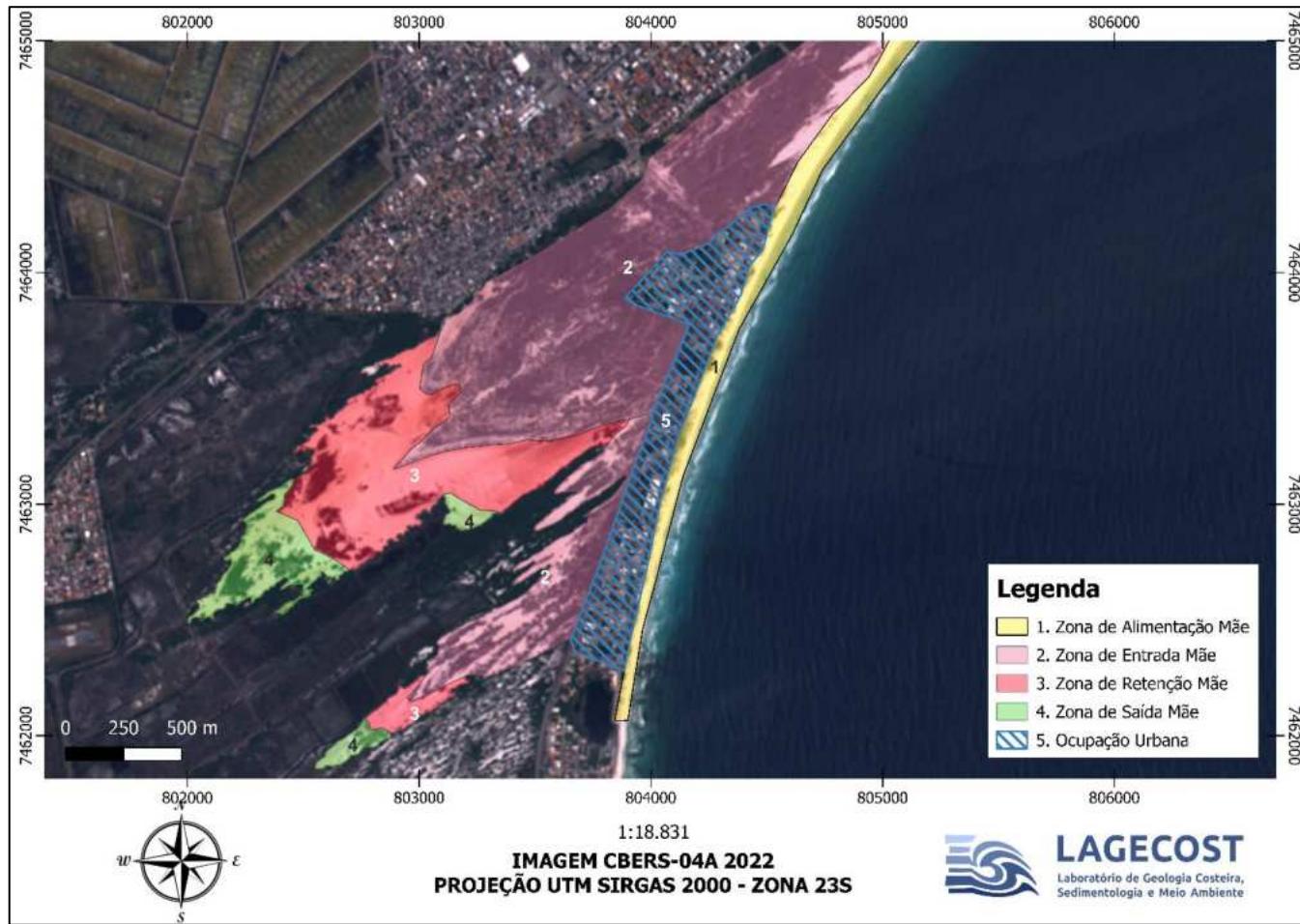
**Figura 8:** Imagem do campo de dunas do Peró, obtida através da modelagem tridimensional, submetidas a processos de soterramento entre 1976 e 2022. Cada linha representa uma seção selecionada para o perfil topográfico. **A:** Seção topográfica Dunas Escalonares; **B:** Seção topográfica Lagoa do Brejo do Matadouro; e **C:** Seção Topográfica a Norte da Lagoa.

A **Figura 9** apresenta o modelo tridimensional e os perfis topográficos referentes ao campo de dunas transgressivo da Mãe na Região de Cabo Frio – Rio de Janeiro.



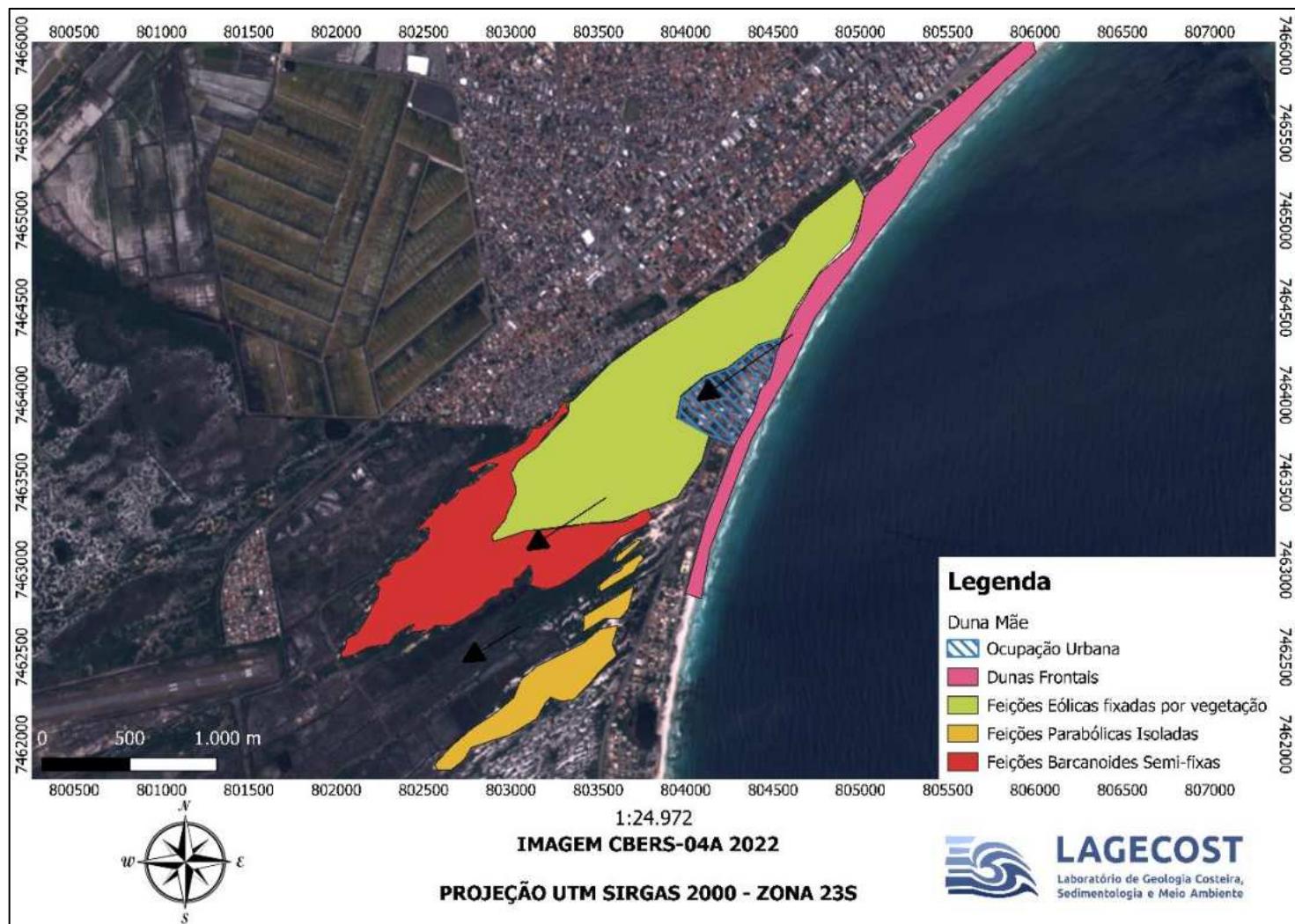
**Figura 9:** Imagem do campo de dunas da Mãe, obtida através da modelagem tridimensional, submetidas a processos de soterramento entre 1976 e 2022. Cada linha representa uma seção selecionada para o perfil topográfico. **D:** Seção topográfica Setor Sul; **E:** Seção topográfica Setor Central; e **F:** Seção Topográfica Setor Norte.

A **Figura 10** apresenta a zona de alimentação do sistema sedimentar eólico (praia), em seguida mostra a planície de deflação eólica (zona de trânsito de material), zona de deposição de material eólico (dunas costeiras) e por último a zona de saída de material eólico da duna Mãe, conforme classificação proposta por Castro (2001).



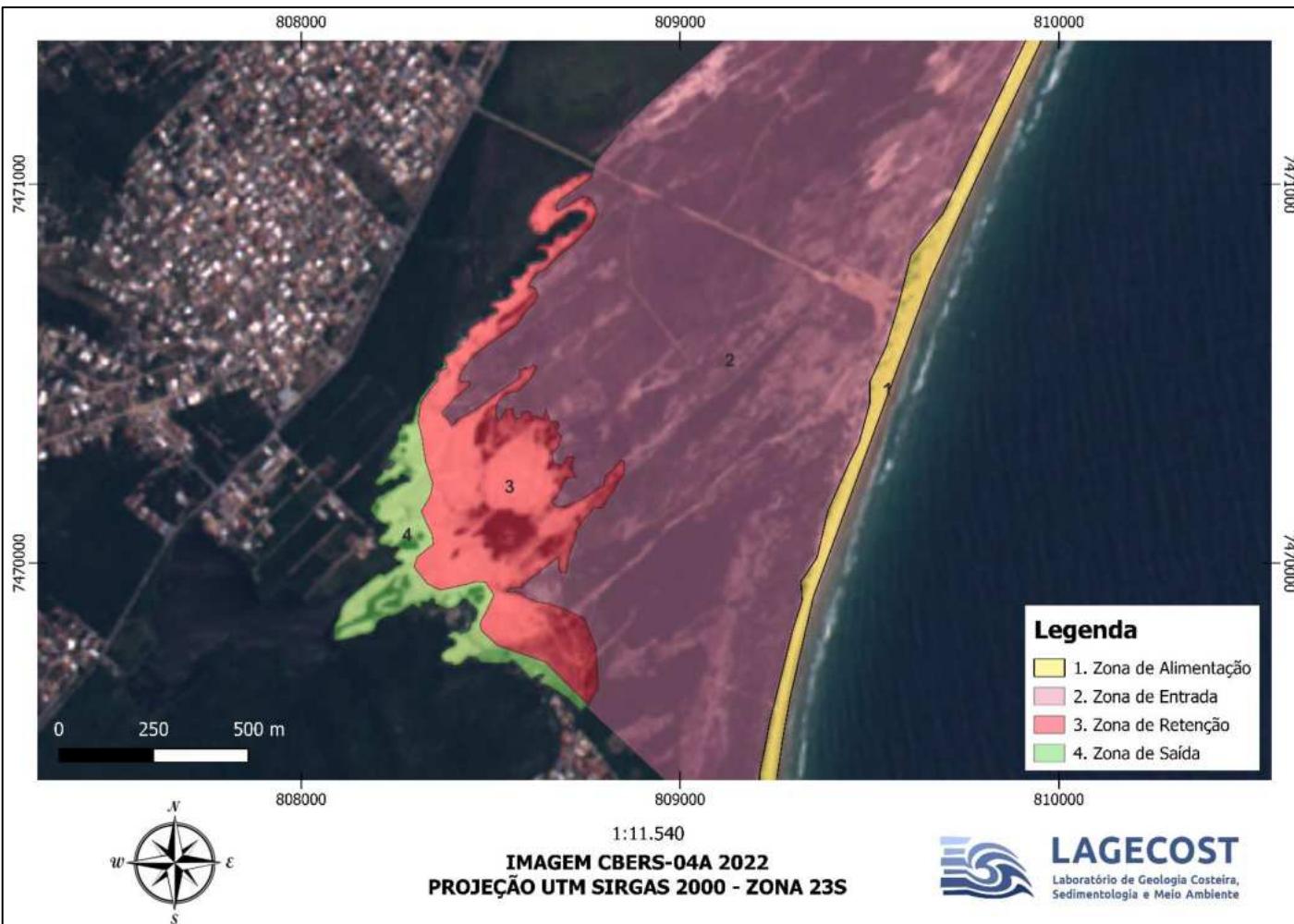
**Figura 10:** Mapa de compartimenta  o geomorfol  gica do sistema e  lico da M  e, segundo classifica  o proposta por Castro (2001).

A **Figura 11** apresenta a classificação de acordo com a metodologia proposta por Castro (2001) das formas e feições eólicas distribuídas ao longo da área investigada. Foi realizada uma compartimentação morfológica constituída pelas seguintes formas e feições, Dunas Frontais, Feições Eólicas fixadas por vegetação, Feições Parabólicas Isoladas, Feições Barcanoides Semifixas e Ocupação Urbana.



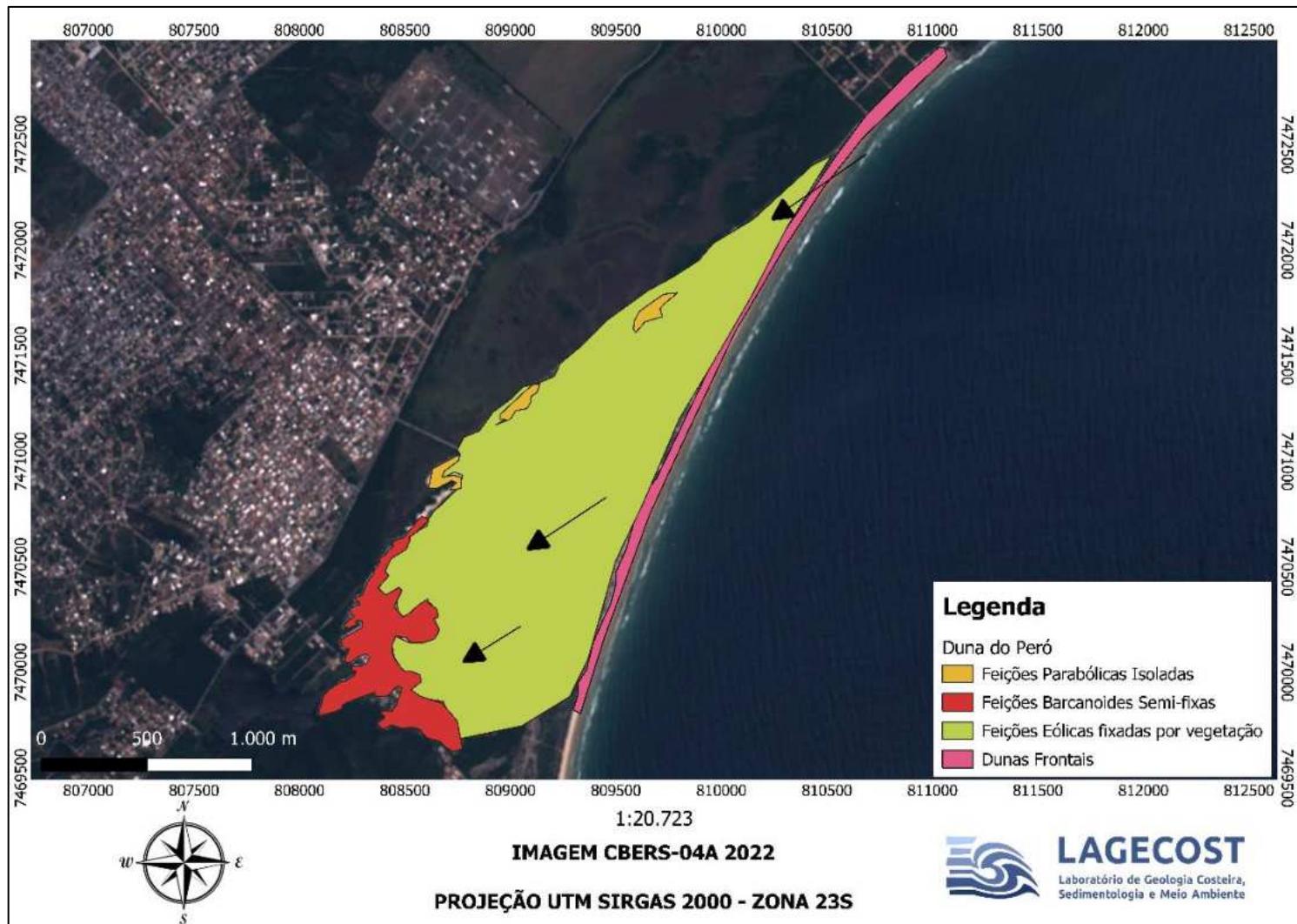
**Figura 11:** Mapa de compartimentação das feições geomorfológicas do sistema eólico da Duna Mãe.

A **Figura 12** apresenta a zona de alimentação do sistema sedimentar eólico (praia), em seguida mostra a planície de deflação eólica (zona de trânsito de material), zona de deposição de material eólico (dunas costeiras) e por último a zona de saída de material eólico da duna do Peró, conforme classificação proposta por Castro (2001).



**Figura 12:** Mapa de compartimentação geomorfológica do sistema eólico do Peró, segundo classificação proposta por Castro (2001).

A **Figura 13** apresenta a classificação de acordo com o agrupamento das formas eólicas identificadas nas zonas investigadas. Foi realizada uma compartimentação morfológica constituída pelas seguintes formas e feições, Dunas Frontais, Feições Eólicas fixadas por vegetação, Feições Parabólicas Isoladas e Feições Barcanoides Semifixas.



**Figura 13:** Mapa de compartimentação das feições geomorfológicas do sistema eólico das Dunas do Peró, conforme classificação proposta por Castro (2001).

A Tabela 3 apresenta as estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletadas nas dunas frontais que fazem parte do sistema eólico da Mãe.

<b>Amostra</b>	<b>11A</b>	<b>11B</b>	<b>11C</b>
<b>Tipo de Amostra</b>	Unimodal, moderadamente bem selecionada	Bimodal, moderadamente bem selecionado	Unimodal, bem selecionada
<b>Classificação</b>	Areia fina moderadamente bem selecionada	Areia muito fina moderadamente bem selecionada	Areia fina bem selecionada
<b>Média (mm)</b>	0,2021	0,1417	0,1721
<b>Desvio padrão (mm)</b>	0,001422	0,001496	0,0013
<b>Assimetria (mm)</b>	0,000175	0,000548	0,00021
<b>Kurtose (mm)</b>	0,000947	0,000683	0,000916
<b>D50 (mm)</b>	0,1961	0,1212	0,167
<b>% Areia</b>	100,0%	100,0%	100,0%
<b>% Areia Grossa</b>	0,4%	0,3%	0,0%
<b>% Areia Média</b>	24,5%	10,6%	7,4%
<b>% Areia Fina</b>	72,5%	33,9%	87,2%
<b>% Areia Muito Fina</b>	2,6%	55,2%	5,5%

**Tabela 3:** Estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletada nas dunas frontais do sistema eólico da Mãe

A Tabela 4 apresenta as estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletadas no campo de dunas do Peró.

<b>Amostra</b>	<b>12A</b>	<b>12B</b>	<b>12C</b>
<b>Tipo de Amostra</b>	Bimodal moderadamente selecionada	Unimodal, bem selecionada	Bimodal, moderadamente bem selecionada
<b>Classificação</b>	Areia média moderadamente selecionada	Areia fina bem selecionada	Areia muito fina moderadamente bem selecionada
<b>Média (mm)</b>	0,2153	0,1839	0,182
<b>Desvio padrão (mm)</b>	0,001778	0,001333	0,001615
<b>Assimetria (mm)</b>	-0,000129	0,000036	-0,000146
<b>Kurtose (mm)</b>	0,00068	0,000929	0,000715

<b>Amostra</b>	<b>12A</b>	<b>12B</b>	<b>12C</b>
<b>D50 (mm)</b>	0,2336	0,1857	0,1978
<b>% Areia</b>	100,0%	100,0%	99,9%
<b>% Lama</b>	0,0%	0,0%	0,1%
<b>% Areia Grossa</b>	5,3%	0,1%	1,5%
<b>% Areia Média</b>	39,2%	12,7%	23,6%
<b>% Areia Fina</b>	27,7%	81,8%	36,2%
<b>% Areia Muito Fina</b>	27,8%	5,4%	38,6%
<b>% Lama</b>	0,0%	0,0%	0,1%

**Tabela 4:** Estatísticas dos resultados dos parâmetros granulométricos das amostras coletada nas dunas frontais do sistema eólico do Peró.

## 7. DISCUSSÃO

Os gráficos de distribuição pluviométrica sugerem média anual entre 740 e 830 mm durante o período analisado. Durante os meses de inverno, julho, agosto e setembro, os níveis pluviométricos médios não ultrapassam 50 mm para os dois intervalos temporais analisados (1966-1983 e 2007-2023), apenas fevereiro apresenta valores inferiores, com média entre 44,1 e 47,7 mm. A análise meteorológica indica que há uma diminuição da precipitação mensal média, durante os meses de inverno, para o intervalo temporal de 2007 a 2023 em relação ao intervalo 1966 a 1983. Considerando o padrão de distribuição pluviométrica, estima-se que a movimentação das frentes de dunas da área de estudo é drasticamente diminuída entre as estações da primavera e do verão, durante o período chuvoso, e retomada durante o inverno, correspondente ao período mais seco.

Durante o inverno, entre os meses de julho a setembro, a taxa de transporte de sedimentos é maior em relação ao verão, entre os meses de janeiro a março, onde os índices pluviométricos são mais elevados, favorecendo a redução da taxa de transporte eólico (Castro, 2006). O clima, por meio dos índices pluviométricos, controla tanto a movimentação das dunas móveis quanto o fornecimento de sedimentos para os campos de dunas, que ocorre através da praia e da planície de deflação eólica (Castro, 2001).

As precipitações na região têm uma forte influência no transporte de sedimentos e na movimentação das dunas (Castro, Antonelo & Gonçalves, 2003). Todavia, o processo do transporte eólico de sedimentos nunca é totalmente interrompido devido aos intervalos de dias sem chuva e a força do vento sobre a zona de alimentação (praia) do sistema eólico (Silveira *et al.*, 2021). Durante as estações intermediárias a movimentação é retomada sob taxas inferiores aos valores do inverno (Rangel, 2005).

As condições semiáridas da área de estudo favorecem a exposição de sedimentos praiais aos ventos de nordeste, retirando-os de repouso e dando início ao transporte através da planície de deflação (Silveira *et al.*, 2021). Posteriormente, os sedimentos em trânsito pela ação dos ventos são depositados sobre as áreas mais elevadas, propiciando a formação dos campos de dunas móveis transgressivas de orientação obliqua a linha de costa. De maneira geral, o clima semiárido local com índices pluviométricos em torno de 800 mm/ano e altas taxas de evaporação são os fatores principais que exercem controle acentuado sobre a morfodinâmica dos sistemas sedimentares eólicos da região de Cabo Frio (Rangel, 2005). De acordo com Silva (2009) e Castro (2018), a ressurgência costeira sobre a região do Cabo Frio é o condicionante responsável pela baixa pluviosidade. O fenômeno da ressurgência, consiste na elevação de águas marinhas subsuperficiais, mais geladas e ricas em nutrientes, para camadas mais superficiais do oceano, favorece a baixa evaporação, como efeito disso, baixos índices pluviométricos são registrados na região.

As taxas de velocidade de movimentação média dos campos de dunas escalonares transgressivas do Peró apresentaram valores distintos, assim como no campo de dunas

transgressivas da duna Mãe. As frentes de dunas móveis movimentam-se sobre a planície costeira da região com a taxa média de 0,4 m/ano na seção “A”, 3,2 m/ano na seção “B” para o campo de dunas do Peró. Para o campo de dunas da Mãe, a taxa média de movimentação das frentes eólicas obtida foi de: 6,1 m/ano na seção “C”, 3,4 m/ano na seção “D” e 1,1 m/ano na seção “E”.

Comparando com os valores obtidos por Cabral e Castro (2022) em dunas do litoral do Espírito Santo, verificou-se uma certa similaridade em relação as taxas de movimentação média de sedimentos eólicos. Apesar de índices pluviométricos anuais distintos, as dunas do Espírito Santo estão submetidas a regime de ventos semelhantes (Cabral e Castro, 2022). Em contraste com os exemplos do sudeste brasileiro, as dunas do Ceará apresentam características distintivas que as diferenciam significativamente (Castro, 2001). No contexto dos sistemas eólicos do nordeste brasileiro, a zona de alimentação (praia), caracterizada por regime de mesomaré, desempenha um papel crucial na dinâmica das dunas. Essa configuração favorece uma maior extensão da pista de vento, intensificando o transporte eólico de sedimentos e, consequentemente, promovendo uma movimentação mais expressiva das dunas.

Durante o intervalo investigado a área soterrada pela movimentação das dunas da Mãe foi de, aproximadamente, 28.000 m<sup>2</sup> em relação ao ano de 1976. Para o campo de dunas do Peró, ocorreu redução de, aproximadamente, 25%, em relação ao ano de 1976. Verificou-se que a área total do campo de dunas soterrada pela ação antrópica e pela movimentação das frentes dunares foi de aproximadamente 665.000 m<sup>2</sup>. Estes valores são bastante significativos, considerando-se a área urbanizada ao redor.

No campo de dunas da Mãe, a altura máxima do perfil é aproximadamente 16 metros na seção D-D'. A variação das alturas máximas dos perfis E-E' e F-F' está correlacionada a interferência antrópica, somada a vegetação, no contexto geomorfológico da planície de deflação, resultando na redução do transporte eólico de sedimentos nos setores central e norte. A seção D-D' ilustra as diferenças de uso e cobertura do solo, onde há, em contraste com as demais seções, menos interferência antrópica - menos obstáculos - na dinâmica do transporte eólico de sedimentos. No contexto do Peró, a altura máxima dos perfis selecionados – aproximadamente 21 metros – é maior em relação aos perfis da duna Mãe, relacionado a presença de anteparos rochosos, adjacente ao campo de dunas, na direção de cavalgamento das frentes eólicas.

A partir da análise dos compartimentos geomorfológicos para os sistemas eólicos investigados é possível caracterizar as seguintes feições geomorfológicas, segundo a classificação proposta por Castro (2001): 1) Dunas longitudinais frontais e de retaguarda; 2) Dunas Oblíquas; 3) Planície de Deflação. Desta maneira, os agrupamentos são compartimentados em diferentes formas, tipo: 1.1) longitudinais e coppice; 2.1) barcanas, barcanóides e parabólicas; 3.1) lençóis mantiformes.

A classificação em subdivisão por formas das dunas, apresentam características distintas, que dependem de aspectos genéticos e do grau de desenvolvimento, levando ao que é conhecido como ciclo geomórfico. Esse círculo em um sistema eólico envolve as diversas transformações que ocorrem em um campo de dunas. No estágio juvenil, forma-se um campo de dunas barcanas ou parabólicas, caso haja vegetação. A maturidade é alcançada quando as formas paralelas ao vento ultrapassam em altura as dunas transversais. Na fase de senilidade, o campo de dunas continua a crescer em termos de dimensões, mas ocorre uma diminuição no volume total de sedimento, enquanto o estágio final do ciclo eólico resulta em uma área de deflação, onde o substrato passa a predominar (Castro, 2001).

No que diz respeito aos resultados dos parâmetros granulométricos, verificou-se um processo de granodecrescência em direção ao interior da planície costeira de Cabo. Essa informação corrobora com trabalhos desenvolvidos por Castro (2001) e Cabral e Castro (2022). A ocorrência de grãos mais grossos, ocorrem principalmente na zona de alimentação do sistema (praia) e os mais finos são identificados na zona de deposição do sistema eólico, principalmente nas dunas do Peró. Assim como as diferenças no grau de seleção, as amostras coletadas na crista de duna em zonas de deposição apresentaram D<sub>50</sub> e média superiores em relação as outras amostras do mesmo sistema investigado. Verificou-se um processo de granodecrescência entre o ambiente de praia e o ambiente deposicional eólico, tal fato deve-se ao retrabalhamento das areias eólicas pela ação do vento de direção nordeste, predominantemente. Essa informação corrobora com trabalhos desenvolvidos por Castro (2001) e Cabral & Castro (2022).

As mudanças da paisagem eólica do campo de dunas do Peró e da Mãe estão relacionadas com o processo de movimentação de dunas sobre a planície costeira. O intenso retrabalhamento dos sedimentos em trânsito, impulsionado pelo regime de ventos de nordeste e baixa pluviosidade, provocaram perdas patrimoniais significativas, envolvendo bens públicos e propriedades privadas (Castro, 2006). Silveira, *et al.* (2021) calcularam que, se mantida as atuais condições de pluviosidade e ventos para a região, o empreendimento privado Áqua Park, a estrada do Guriri e a lagoa do Brejo do Matadouro serão completamente soterrados pelas dunas da região do Peró em torno de 80 anos.

O presente trabalho, utilizando as taxas de movimentação média aqui calculados, sugere que a região do empreendimento privado Áqua Park, a estrada do Guriri e a lagoa do Brejo do Matadouro serão completamente soterrados em, aproximadamente, 150 anos pela ação do transporte de sedimento eólicos. Adjacente a infraestruturas aeroportuárias e áreas urbanas, o presente trabalho sugere, através das taxas de movimentação média calculadas, que o campo de dunas da Mãe soterrará as áreas à barlavento em, aproximadamente, 100 anos caso sejam mantidas as condições climáticas da região.

## **8. CONCLUSÕES**

As transformações de curto prazo, e ainda ativas, nos depósitos sedimentares eólicos da região de Cabo Frio são decorrentes da intensa movimentação de sedimentos provenientes da praia, impulsionados por regime de ventos unimodal, predominantemente de nordeste, submetido às condições semiáridas decorrentes da ressurgência costeira. Verificou-se que a dinâmica do transporte eólico de sedimentos tornou-se mais acelerada nos últimos 20 anos, constatado pelo aumento relativo das taxas de movimentação média no intervalo temporal 2005 - 2022.

Apesar de não ser um mecanismo de transporte de sedimentos com alta regularidade, o cavalgamento de frentes de dunas sobre a planície costeira de Cabo Frio, acarreta grandes impactos ambientais envolvendo o soterramento por dunas de residências, vias públicas e infraestrutura urbana municipal na região investigada. Estradas e ruas já foram em parte soterradas por feições transgressivas, acarretando perdas patrimoniais para entes públicos e privados. No campo de dunas da Mãe, o presente trabalho estima-se que, mantidas as condições climáticas da área, a pista do Aeroporto de Cabo Frio e áreas urbanas nas imediações serão soterradas pelas areias eólicas em, aproximadamente, 100 anos. No campo de dunas da região do Peró, estima-se em 150 anos o soterramento por completo de toda área envolvendo o empreendimento privado Áqua Park, a estrada do Guriri e a lagoa do Brejo do Matadouro. As áreas a serem soterradas devem ser consideradas como zonas de interdição e de proteção ambiental permanente – APP.

A infraestrutura urbana e aeroportuária da região está constantemente sujeita a perdas patrimoniais associadas a movimentação de dunas, caso não sejam elaborados planos de mitigação para proteção social e ambiental. Dessa maneira, este trabalho visa oferecer um curto embasamento técnico em uma temática de extrema complexidade para entidades envolvidas no planejamento urbano e rodoviário de municípios sujeitos ao risco geológico associado a movimentação de dunas sobre a planície costeira.

## 9. REFERÊNCIAS

- Alcántara-Carrió, J. and Alonso, I. (2000) 'Propuestas metodológicas para el estudio de los ambientes eólicos costeros actuales', in Andrés, J.R. and Gracia, F.J. (eds.) Geomorfología Litoral Procesos Activos. Instituto Tecnológico GeoMineiro de Esparia, pp. 81-92.
- Areias, C., Spotorno-Oliveira, P., Bassi, D., Iryu, Y., Nash, M., Castro, J.W.A. and Tâmega, F.T.S. (2020) 'Holocene sea-surface temperatures and related coastal upwelling regime recorded by vermetid assemblages, southeastern Brazil (Arraial do Cabo, RJ)', *Marine Geology*, 425, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.margeo.2020.106183.
- Bagnold, R.A. (1933) 'A Further Journey Through the Libyan Desert', *The Geographical Journal*, 82(2), pp. 103-126. doi:10.2307/1785658.
- Bagnold, R.A. (1941) *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen. 265 p.
- Barbieri, E.B. (1997) 'Flutuações climáticas em Cabo Frio', *Revista do Departamento de Geografia*, 11, pp. 95-212. doi:<https://doi.org/10.7154/RDG.1997.0011.0008>.
- Bohrer, C.B.A., Dantas, H.G.R., Cronemberger, F.M., Vicens, R.S. and Andrade, S.F. (2009) 'Mapeamento da vegetação e do uso do solo no Centro de Diversidade Vegetal de Cabo Frio, Rio de Janeiro, Brasil', *Rodriguésia*, 60(1), pp. 1–23.
- Cabral, C.L., Castro, J.W.A. and Cunha, A.M. (2018) 'Registros das Variações do Nível Relativo do Mar na Península de Armação dos Búzios, Rio de Janeiro: Análise de Dados Faciológicos e Geocronológicos', *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 41(1), pp. 130-141. doi:10.11137/2018\_1\_130\_141.
- Cabral, C.L. & Castro, J.W.A. (2022) 'Coastal dunes migration over the Itaúnas district – Espírito Santo, humid tropical coasts of Southwest Brazil', *Journal of South American Earth Sciences*, 119. doi:10.1016/j.jsames.2022.104016.
- Cabral, C. L. 2024, 'Dinâmica sedimentar do sistema eólico contemporâneo de Itaúnas – Norte do Estado do Espírito Santo, Sudeste Brasileiro', Tese de Doutorado em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, Rio de Janeiro.
- Castro, J.W.A. (2001) Geomorfologia do sistema sedimentar eólico de Paracuru - Ceará. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia - Geomorfologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 202 p.
- Castro, J.W.A., Antonelo, L.L. and Gonçalves, R.A. (2003) 'Dunas costeiras oblíquas do município de Cabo Frio / RJ - Brasil', *Ciências da Terra*, 5, pp. 26-29.

Castro, J.W.A. (2005) 'Burying processes carried out by a mobile transversal dunefield, Paracuru County, State Ceará, Brazil', *Environmental Geology*, 49(2), pp. 214-219. doi:10.1007/s00254-005-0055-6.

Castro, J.W.A. (2006) 'Dunas da Praia do Peró – APA Pau Brasil – Cabo Frio / RJ: Movimentação de Sedimentos Eólicos e Problemas de Soterramento', in Congresso Brasileiro de Geologia, 43, Aracaju. Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju: Sociedade Brasileira de Geologia. pp. 24-25.

Castro, J.W.A., Sugio, K. et al. (2014) 'Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil', *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2), pp. 671-683. doi:10.1590/0001-3765201420140007.

Castro, J.W.A., Malta, J.V., Miguel, L.L.A.J., Cabral, C.L. & Passemilio, A.B. (2017) 'Chronological reconstruction of eolianites and transversal mobile dunes of northwest coast of Ceará State - Brazil, in the last 3000 cal yrs BP', *Aeolian Research*, 28, pp. 51-57.

Castro, J.W.A. (2018) 'The Morphodynamics Behaviour of a Cross-Shore Sandbar in a Microtidal Environment, Anjos Cove, Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brazil', in Botero, C.M., Cervantes, O.D. and Finkl, C.W. (eds.) *Beach Management Tools - Concepts, Methodologies and Case Studies*. Coastal Research Library, 24. Springer International Publishing, pp. 319-329.

CBHLSJ (2024) Comitê de Bacia Lagos São João. Disponível em: [Bacias Hidrográficas – Comitê da Bacia Lagos São João](#) (Acesso: 2 de novembro de 2024).

CILSJ (2003) Consórcio Intermunicipal Lagos São João. Disponível em: [Dados Gerais - Consórcio Intermunicipal Lagos São João](#) (Acesso: 2 de novembro de 2024).

Coe, H.H.G. & Carvalho, C.N. (2013) 'Cabo Frio - um enclave semiárido no litoral úmido do Estado do Rio De Janeiro: Respostas do clima atual e da vegetação pretérita', *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 17(1), pp. 136-152. doi:10.11606/issn.2179-892.geousp.2013.74307.

Cunha, A.M., Castro, J.W.A., Pereira, F.M.B., Carvalho, M.A. and Suguió, K. (2017) 'Variações do nível relativo do mar durante o Holoceno na bacia hidrográfica do Rio Una, região de Cabo Frio - Rio de Janeiro: aspectos sedimentológicos, faciológicos e geocronológicos', *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(1). doi: 10.20502/rbg.v18i1.1039.

Davies, J.L. (1980) *Geographical variation in coastal development*. New York: Longman.

Fernandes, D. and Castro, J.W.A. (2020) 'Transporte de sedimentos induzido por ondas no segmento norte da enseada da Baía Formosa, Rio das Ostras, Estado do Rio de Janeiro', *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(4), pp. 783–795. DOI: dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1900.

Fernandes, D. & Castro, J.W.A. (2024). Longshore sediment transport rate in Formosa Bay, Rio de Janeiro State - Southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 137, 104834. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104834>

- Finkel, H.J. (1959) 'The barchans of Southern Peru', *Journal of Geology*, 67, pp. 614-647.
- Fryberger, S.G. (1979) 'Dune Forms End Wind Regime', in McKee, E.D. (ed.) *A Study of Global Sand Seas*. Geological Survey Professional Paper 1052, Printing Office, Washington, pp. 137-169.
- Gao, J., Kennedy, D.M. and Konlechner, T.M. (2020) 'Coastal dune mobility over the past century: a global review', *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 44(6), pp. 814–836. doi:10.1177/0309133320919612.
- Goldsmith, V. (1977) 'The "VAMP" coastal dune classification', *SRAMSOE N° 143*, pp. 20-26.
- Goldsmith, V. (1978) 'Coastal Dunes', in Davis Junior, R.A. (ed.) *Coastal Sedimentary Environments*. New York: Springer, pp. 171-236.
- Heibron, M., Valeriano, C.M., Tassinari, C.C.G., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Siga Jr, O. and Trouw, R.A.J. (2008) 'Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: Comparative tectonic evolution and open questions', in Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito-Neves, B.B. and de Wit, M. (eds.) *West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society of London, Special Publication 294, pp. 211–232.
- Heibron, M., Eirado, L.G. and Almeida, J. (2016) Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:400.000 Programa Geologia do Brasil (PGB), Mapas Geológicos Estaduais. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belo Horizonte.
- Hesp, P.A. (2013) 'Conceptual models of the evolution of transgressive dunefield systems', *Geomorphology*, 199, pp. 138-149. doi:10.1016/j.geomorph.2013.05.014.
- IBGE (2024) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: [IBGE | Cidades@ | Rio de Janeiro | Cabo Frio | Panorama](#) (Acesso: 17 de outubro de 2024).
- INMET (2023) Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: [INMET :: BDMEP](#) (Acesso: 11 de maio de 2024).
- INPE (2022) Instituto de Pesquisas Espaciais. Disponível em: [INPE :: Catálogo de Imagens](#) (Acesso: 25 de março de 2023).
- Kukal, Z. (1971) *Geology of recent sediments*. Praga: Czechoslovac Acad. Ssi. 490 p.
- Leite, G.S., Dourado, M. and Candella, R. (2006) 'Estudo preliminar da ressurgência de Cabo Frio', in *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis.
- Lettau, K. & Lettau, H.H. (1978) 'Experimental and Micrometeorological Studies of Dune Migration', in Lettau, K. and Lettau, H.H. (eds.) *Exploring the World's Driest Climate*. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Institute of Environmental Sciences, pp. 110-147.

Martin, L., Sugio, K. & Dominguez, J.M.L. (1997) Geologia do Quaternário Costeiro do litoral norte do Estado do Rio de Janeiro e Espírito Santo. CPRM. 125 p.

McKee, E.D. (1979) 'Introduction to a study of global sand seas', in McKee, E.D. (ed.) A study of global sand seas. U.S. Geological Survey Professional Paper 1052, pp. 1-20.

Miguel, L.L.A.J. & Castro, J.W.A. (2018) 'Evolução Geomorfológica do Sistema Laguna - Barreira de Bilene, Costa de Moçambique, África: Padrões Climáticos e Dinâmica Sedimentar', Revista Brasileira de Geomorfologia, 19(1), pp. 75-91. doi:10.20502/rbg.v19i1.1276.

Nickling, W.G. (1986) Aeolian Geomorphology. London: Allen and Unwin. 311 p.

Parker Gay Jr, S. (1962) 'Origen, Distribucion y Movimiento de las Arena Eolicas en el Area de Yauca e Palpa', in Congreso Nacional de Geología Peru, 2, tomo 37, pp. 37-58.

Pinho, U.F. (2003) 'Caracterização dos estados de mar na Bacia de Campos'. Dissertação (Mestrado) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 137 p.

Rangel, F.E. (2005) 'O Campo de Dunas Escalonares na Praia do Peró – Cabo Frio/RJ: transporte de sedimentos, formas resultantes e impactos associados', Dissertação (Programa de Pós-graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 97 p.

Reboita, M.S., Ambrizzi, T. & Rocha, R.P. (2009) 'Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems', Revista Brasileira de Meteorologia, 24(1), pp. 48-55. doi:10.1590/S0102-77862009000100005.

Schmitt, R.S. (2001) 'A Orogenia Búzios – Caracterização de um evento tectono-metamórfico no domínio tectônico Cabo Frio – Sudeste da faixa Ribeira'. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 271 p.

Schmitt, R.S., Trouw, R.A.J., Van Schmus, W.R. and Pimentel, M.M. (2004) 'Late amalgamation in the central part of Western Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collision orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil)', *Precambrian Research*, 133, pp. 29–61.

Schmitt, R.S. (2012) 'Geologia e recursos minerais da folha Rio das Ostras SF.24-Y-A-IV e Cabo Frio SF.23-Z-B-VI, Estado do Rio de Janeiro. Escala 1:100.000'. Organizador: Luiz Carlos da Silva. Belo Horizonte: CPRM.

Shepard, F.P. (1976) 'Coastal classification and changing coastlines', *Geosciences and Man*, 14, pp. 53-64.

Sherman, D.J. & Hotta, S. (1990) 'Aeolian Sediment Transport: Theory and Measurements', in Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. & Carter, R.W.G. (eds.) *Coastal Dunes: Form and Process*. Chichester: John Wiley & Sons, pp. 17-37.

Silva, A.C. (2009) 'Dinâmica Batimétrica e Sedimentológica da Região do Cabo Frio, Estado do Rio de Janeiro', Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 157 p.

Silveira, I.R.L., Castro, J.W.A., Fernandes, D., Cabral, C.L., Junior, W.C.G. & de Oliveira, D.M.V. (2021) 'Dinâmica das Dunas Escalonares Transgressivas Sobre a Região do Peró - Cabo Frio, Rio de Janeiro', Revista Brasileira de Geomorfologia, 22(4). doi:10.20502/rbg.v22i4.2041.

Simons, D.B., Richardson, E.V. & Nordin Junior, C.F. (1965) 'Bedload equation for ripples and dunes', United States Geological Survey, 462(H), pp. H1-H9. doi:10.3133/pp462H.

Trompette, R. (1994) *Geology of western Gondwana (2000-500 Ma): Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa*. Rotterdam: A.A. Balkema. 350 p.

Tsoar, H. & Moller, J.T. (1986) 'The role of vegetation in the formation of linear sand dunes', in Nickling, W.G. (ed.) Aeolian Geomorphology. Boston: Allen and Unwin, pp. 75-95.

Turcq, B., Martin, L.F.J.L., Suguio, K., Pierre, C. and Tasavaco-Ortega, L. (1999) 'Origin and evolution of the Quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro', in Knoppers, B.A., Bidone, E.D.E. and Abrão, J.J. (eds.) *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil*. Niterói: Eduff, Série Geoquímica Ambiental, pp. 25–46.

Valentin, J.L. (1984) 'Analyses des paramètres hydrobiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil)', *Marine Biology*, 82, pp. 259-276.

Werner, K., Illeberger, W.K. & Rust, L. (1988) 'A sand budget for the Alexandria coastal dunefield, South Africa', *Sedimentology*, 35(3), pp. 513-521. doi:10.1111/j.1365-3091.1988.tb01001.x.