



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

WILLIAM JEOVANINI FUCKS

**AVALIAÇÃO DA MOBILIDADE DO CAMPO DE DUNAS HOLOCÊNICO
ENTRE OS BALNEÁRIOS DE YPUÃ E O FAROL DE SANTA MARTA,
LITORAL CENTRO-SUL DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Porto Alegre, 2021

WILLIAM JEOVANINI FUCKS

**AVALIAÇÃO DA MOBILIDADE DO CAMPO DE DUNAS HOLOCÊNICO
ENTRE OS BALNEÁRIOS DE YPUÃ E O FAROL DE SANTA MARTA,
LITORAL CENTRO-SUL DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto a disciplina Projeto Temático III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(a):

Prof.(a) Dr.(a) Maria Luiza Correa da Camara Rosa

Porto Alegre, 2021

CIP - Catalogação na Publicação

FUCKS, WILLIAM JEOVANINI
AVALIAÇÃO DA MOBILIDADE DO CAMPO DE DUNAS
HOLOCÊNICO ENTRE OS BALNEÁRIOS DE YPUÃ E O FAROL DE
SANTA MARTA, LITORAL CENTRO-SUL DO ESTADO DE SANTA
CATARINA / WILLIAM JEOVANINI FUCKS. -- 2021.
56 f.
Orientadora: MARIA LUIZA CORREA DA CAMARA ROSA.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1. Geologia Costeira. 2. Sensoriamento Remoto. 3.
Variações Climáticas. 4. Gestão de Áreas Costeiras. 5.
Preservação. I. CORREA DA CAMARA ROSA, MARIA LUIZA,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Avaliação da mobilidade do campo de dunas Holocênico entre os balneários de Ypuã e o Farol de Santa Marta, litoral centro-sul do estado de Santa Catarina** elaborado por **William Jeovanini Fucks**, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg

Dr. Cristiano Fick

Ms. Mariah Xavier Rocha

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Plínio e Ivete, pelo exemplo de luta e perseverança, os quais foram essenciais durante esta jornada acadêmica, assim como serão por toda a vida. Ao meu irmão, Samuel, que me faz enxergar as coisas sempre pela melhor perspectiva e acreditar que tudo vale a pena.

Aos meus tios, Odir e Juca, os quais considero uma grande inspiração, sempre em busca de conhecimento e dispostos a troca de ideias e conselhos, me mantendo no rumo.

A minha querida, Pâmela, pela paciência e carinho depositado, assim como também por toda a força e companherismo que tornaram o caminho mais tranquilo e belo. Aos amigos que tive a felicidade conhecer e estreitar laços ao longo dos anos de graduação e toda a troca e vivência envolvida.

Agradeço também a minha orientadora, Maria Luiza, pelo apoio e confiança que me fizeram seguir adiante. A todos os professores que tive o privilégio de conhecer e conviver, obrigado por todos os ensinamentos e experiências compartilhadas.

RESUMO

Este estudo tem o objetivo de caracterizar as taxas de mobilidade do campo de dunas holocênico localizado a aproximadamente 5km à nordeste do Farol de Santa Marta, entre os promontórios rochosos da praia da Galheta e Ypuã , litoral centro sul do estado de Santa Catarina. O estudo realizado procurou descrever a morfodinâmica do campo de dunas livres, estabelecendo relações em escalas temporais e cartográficas distintas. A análise foi realizada através da obtenção de dados meteorológicos e da observação de fotografias aéreas e imagens de satélite, utilizadas para caracterizar a morfologia do campo de dunas, áreas vegetadas e ocupação antrópica, através de técnicas de sensoriamento remoto. Foram identificadas diferentes feições e tipos de dunas correspondentes a dunas barcanas, cristas barcanóides e dunas transversais. Foi definido também o perímetro do campo de dunas onde ocorre a maior taxa de mobilidade, calculando através deste a taxa de 27 m/ano para os últimos onze anos, migrando para o sentido SW. Esta é fortemente influenciada pela ação dos ventos predominantes de direção NE, NNE, os quais foram definidos através da distribuição de frequência considerando a velocidade e direção média dos ventos, interpretados a partir de rosas dos ventos correspondentes ao fluxo eólico durante cada estação do ano.

Palavras-Chave: Geologia costeira, sensoriamento remoto, variações climáticas, gestão de áreas costeiras, preservação.

ABSTRACT

This study has the purpose to characterize the mobility rates of the Holocene dune field located approximately 5km northeast of the Farol de Santa Marta, between the rocky promontories of the beaches of Galheta and Ypuã, at the southeastern coastal center of the state of Santa Catarina. The study carried out describes the morphodynamics of the free dune field, establishing relationships in different time and cartographic scales. The analysis was achieved by obtaining meteorological data and observing aerial photographs and satellite images, used to characterize the morphology of the dune field, vegetated areas and anthropic occupation using remote sensing techniques. Different features and types of dunes were identified corresponding to barchan dunes, barchanoid ridges and transversal dunes. It was also defined the perimeter of the dune field where the highest rate of mobility occurs, calculating through this rate of 27 m/(per) year for the past eleven years, migrating to the SW direction. This is strongly influenced by the action of the predominant winds of NE, NNE direction, which were defined from the frequency distribution considering the speed and average direction of the winds, interpreted from wind roses corresponding to the wind flow during each season of the year.

Keywords: Coastal Geology, remote sensing, climatic variations, management of coastal areas, preservation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Localização da área de estudo.....	12
Figura 2. Compartimentação da Província Costeira de Santa Catarina.....	14
Figura 3. Corte esquemático mostrando a estrutura da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.....	15
Figura 4. Estratigrafia geral da Província Costeira catarinense.....	15
Figura 5. Divisão setorial da Planície Costeira de Santa Catarina e sedimentos superficiais da plataforma continental catarinense.....	16
Figura 6. Classificação dos estados morfodinâmicos de praias definidos por Short (1999). Fonte: SOUZA et al. (2005).....	17
Figura 7. Fotos representativas de fluxos gravitacionais do tipo avalanche.....	18
Figura 8. Classificação física do tamanho de grãos associados ao tipo de transporte predominante.....	18
Figura 9. Tipos de movimento das partículas de areia em meio eólico.....	19
Figura 10. Sequência dos tipos de dunas com ventos unidirecionais, gradando da direta para a esquerda, de dunas transversais, cristas barcanóides a dunas barcanas.....	21
Figura 11. Blowout e dunas para bólicas controladas pela estabilização parcial de vegetação. Fonte: Mckee (1979).....	21
Figura 12. Dunas de cristas retas, dunas estrela e dunas reversas da esquerda para a direita, variando conforme a direção dos ventos.....	22
Figura 13. Fotografias aéreas verticais das cidades de Cidreira e arredores, dos anos de 1974 e 2004. A comparação das duas fotografias evidencia a redução do campo eólico devido ao avanço da urbanização.....	24
Figura 14. Fluxograma representando as etapas de desenvolvimento do projeto.....	26
Figura 15. A: Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), com câmera acoplada, modelo Phantom 4 da marca DJI; B: Fotografia aérea capturada através do VANT onde é possível observar um dos alvos do GCP; C: Base do GNSS RTK ao fundo e antena para a coleta de pontos de controle (GCP) a frente.....	30
Figura 16. A: Rosa dos ventos para a primavera; B: Rosa dos ventos para o verão; C: Rosa dos ventos para o outono; D: Rosa dos ventos para o inverno.....	33
Figura 17. Distribuição de frequência dos ventos predominantes com velocidades acima de 5m/s	34
Figura 18. Distribuição da precipitação ao longo dos anos de 2009 a 2020.....	35
Figura 19. Fotografia aérea do ano de 1957 georreferenciada. Destaque para a delimitação do campo de dunas.....	36
Figura 20. Imagem de Satélite de 2020 (Google Earth) georreferenciada. Sobreposição do campo de dunas no ano de 1957 e 2020.....	36
Figura 21. Sobreposição do campo de dunas no ano de 1957 e 2020. Delimitação de estradas e residências existentes no ano de 2020.....	37
Figura 22. Delimitação do perímetro de propagação do campo e Dunas Transversais.....	38

Figura 23. Delimitação do perímetro de propagação do campo e Dunas Compostas.....	38
Figura 24. Sobreposição de períodos para comparação morfológica e análise da propagação da linha de frente do campo.....	38
Figura 25. Dunas barcanas coalescendo e região interduna bem desenvolvidas.....	39
Figura 26. Campo de dunas em forma de manto de aspersão com provável associação a eventos de tempestade.....	39
Figura 27. Campo de dunas registrando uma época de umidade elevada.....	40
Figura 28. Delimitação do perímetro de propagação do campo e dunas transversais a barcanóides.....	41
Figura 29. Delimitação do perímetro de propagação do campo e dunas transversais a barcanóides.....	41
Figura 30. Delimitação do perímetro de propagação do campo, dunas transversais a barcanóides e sentido de propagação dos ventos.....	42
Figura 31. Delimitação do perímetro de propagação do campo, dunas transversais a barcanóides e sentido de propagação dos ventos.....	42
Figura 32. Sobreposição de períodos para comparação morfológica e análise da propagação da linha de frente do campo e variação da direção predominante do vento.....	42
Figura 33. Dunas barcanóides com alto contraste em relação ao interduna, período de maior umidade no sistema.....	44
Figura 34. Dunas barcanóides com baixo contraste em relação ao interduna, período de estiagem.....	44
Figura 35. Textura demonstrando cristas bem definidas. Possível transição de dunas barcanas e cristas barcanóides para dunas reversas.....	44
Figura 36. Sobreposição do perímetro de avanço do campo em 2009 para comparação com o ano de 2020.....	46
Figura 37. Análise qualitativa para estimativa da taxa de propagação da linha de frente do campo de dunas.....	46
Figura 38. Ortofotomosaico construído a partir de imagens aéreas capturadas com VANT.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS E METAS.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 SISTEMAS DEPOSICIONAIS	14
2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CAMPO DE DUNAS	17
2.2.1 Ventos com uma única direção dominante.....	20
2.2.2 Obstáculos que impedem o avanço das dunas.....	21
2.2.3 Ventos de direções variadas.....	22
2.3 PROCESSO DE MIGRAÇÃO DE DUNAS LIVRES	22
2.4 PREDOMINÂNCIA DOS VENTOS E OUTROS FATORES CLIMÁTICOS	23
2.5 OCUPAÇÃO ANTRÓPICA	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 GEOPROCESSAMENTO DE AEROFOTOGRAFIAS.....	27
3.2 GEOPROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE	27
3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS CLIMÁTICO.....	28
3.4 ANÁLISE DE DADOS.....	28
3.5 LEVANTAMENTO DE DADOS COM VANT	29
3.5.1 Levantamento de dados em campo	29
3.5.2 Processamento de imagens.....	30
3.6 PONTOS CRÍTICOS E VULNERABILIDADES.....	31
4. RESULTADOS	32
4.1 VELOCIDADE E DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS	32
4.2 ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO.....	34
4.3 DISPOSIÇÃO GERAL DO CAMPO DE DUNAS E OCUPAÇÃO ANTRÓPICA.....	35
4.4 DINÂMICA DO CAMPO DE DUNAS E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS	37
4.5 ORTOFOTOMOSAICO	46
5. DISCUSSÕES	48
6. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho investigou a dinâmica do campo de dunas situado na região centro-sul do litoral catarinense, localizado a aproximadamente 5km à nordeste do Farol de Santa Marta, entre os promontórios rochosos da praia da Galheta e Ypuã (Figura 1). Trata-se de um sistema deposicional litorâneo diretamente associado aos processos costeiros, como a variação do nível do mar, ação das ondas, das marés, dos ventos e das correntes litorâneas (Giannini, 1993). O campo de dunas possui uma dinâmica intensa, onde sedimentos são transportados por metros ao longo do período de dezenas de anos, provocando mudanças no posicionamento das dunas (Oliveira *et al.*, 2019). Este sistema não possui aporte sedimentar fluvial para a alimentação do campo de dunas, o que sugere o retrabalhamento por erosão dos sedimentos da linha de costa e o transporte dos sedimentos das dunas para dentro da lagoa Jaguaruna, provocando o assoreamento da mesma (Souza, 2015). A área de estudo está localizada em uma região cujo crescimento acelerado provoca intenso processo de transformação sócio-espacial (Bonetti, 2011), embora o crescimento da sua malha urbana ainda não impacte diretamente no aporte de sedimentos para as dunas. De acordo com Tomazelli *et al.* (2008), nas regiões onde ocorre o avanço da urbanização, existe impacto direto no processo de alimentação para o campo de dunas.

Na área de estudo, pertencente à Zona Subtropical, ocorre a influência de massas atmosféricas marítimas, de origem tropical e polar (Strahler, 1977). Levando em consideração fatores estáticos, como por exemplo a escarpa do Planalto do Serra Geral, com altitudes de até 1000 metros, o seu posicionamento geográfico e relevo provocam na região a condensação das massas úmidas de origem marítima, aumentando a tendência de precipitação e também modificando o padrão de circulação dos ventos, tanto marítimos quanto continentais (Tomazelli, 1990). Segundo Giannini (1993), existem perturbações climáticas episódicas recentes, cujo aumento temporário anômalo de pluviosidade influenciaram na sedimentação costeira regional, onde o litoral sul catarinense foi palco de pelo menos três eventos deste tipo nos últimos 45 anos.

Neste contexto, este estudo visou avaliar a variação da taxa de avanço do campo de dunas em períodos distintos ao longo de 63 anos, tendo como hipótese que períodos de maior umidade desaceleram a migração do campo, pois a areia úmida é mais resistente ao transporte pelo vento devido a maior coesão entre as partículas e

a presença de áreas alagadas na região interduna, pode atuar como barreira, proporcionando a decantação dos sedimentos submetidos ao transporte eólico ao entrar em contato com a superfície aquosa.

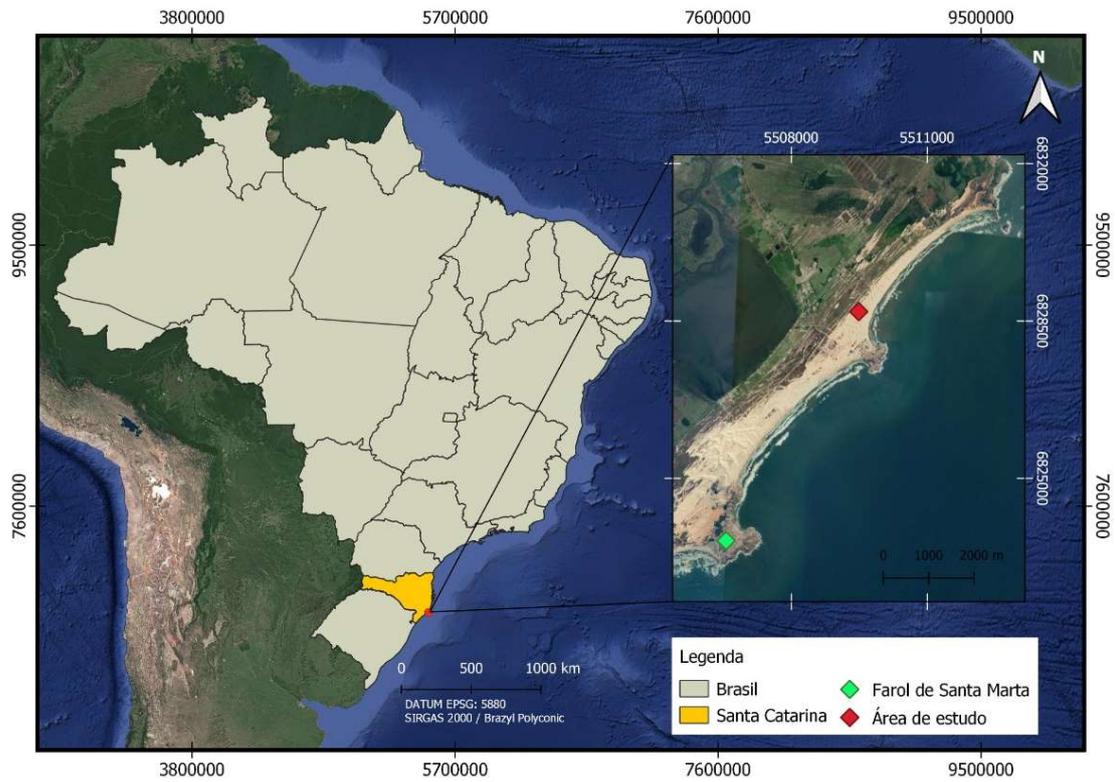


Figura 1: Localização da área de estudo.

1.1 OBJETIVOS E METAS

O objetivo geral do trabalho consistiu em investigar a taxa de migração das dunas e avaliar a causa da provável diminuição do volume do campo de dunas, descrevendo de forma detalhada como ocorre o comportamento do campo e como os fatores antrópicos e climáticos estão atrelados a sua evolução.

Os objetivos específicos visam a definição e descrição dos elementos fisiográficos que compõem a área de estudo e a sua correlação com dados meteorológicos sendo estes elementos definidos da seguinte forma:

- Áreas com areia e áreas úmidas;
- Crescimento urbano;
- Variabilidade do sentido de migração das dunas;
- Tipos de dunas e modificações morfológicas;
- Posicionamento da área ativa do campo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, a ocupação antrópica das áreas costeiras litorâneas vem se intensificando. O crescimento da malha urbana nas áreas costeiras pode comprometer a alimentação do sistema do campo de dunas, contribuindo para a extinção do mesmo. O estudo serve como subsídio para programas locais de monitoramento e gestão ambiental das zonas costeiras, como estratégias à tomada de decisões no âmbito de conservação e de administração pública. A dinâmica e estrutura do campo de dunas é uma janela aberta para a compreensão de ambientes geológicos do passado que pode servir como análogo para a caracterização de formações rochosas sedimentares. Também, do ponto de vista de mudanças climáticas para estabelecer correlações e avaliar o quanto essas interagem na dinâmica do campo de dunas, servindo como base para o estudo de sistemas antigos. Logo, através da observação da influência do clima nos sistemas modernos é possível olhar o registro de sistemas antigos para entender o clima do passado e planejar o futuro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMAS DEPOSICIONAIS

Segundo Diehl & Horn Filho (1996), a Província Costeira de Santa Catarina (PCSC) é composta por duas unidades geológicas principais: o embasamento e as bacias de Pelotas e Santos (Figura 2). O embasamento cristalino, composto por rochas graníticas, complexos metamórficos, metavulcânicas e metassedimentares, aflora por grande parte da PCSC, como maciços rochosos, promontórios, pontais e ilhas continentais, representando as terras altas da província costeira, acompanhando a linha de costa desde as proximidades do cabo de Santa Marta e seguindo até as maiores latitudes do litoral catarinense. A Planície Costeira, corresponde aos terrenos de baixa altitude, posicionados entre o continente e o oceano, sendo composta de sedimentos consolidados a semi-consolidados de origem clástica continental, transicional e marinha, caracterizados através de dois tipos de sistema deposicional: sistema continental e sistema transicional ou costeiro.

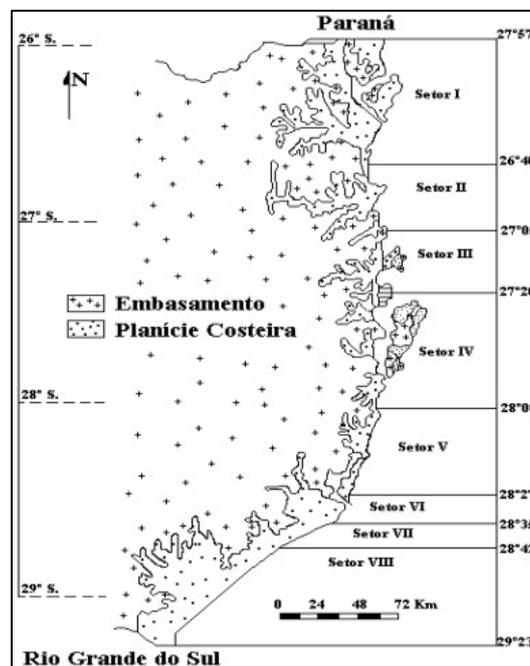


Figura 2. Compartimentação da Província Costeira de Santa Catarina.

Fonte: Diehl & Horn Filho (1996).

O sistema costeiro, é definido na maioria das regiões da PCSC como depósitos do tipo laguna-barreira, associado as variações do nível relativo do mar de ocorrência no Quaternário, compreendendo depósitos do Pleistoceno médio (Sistema II),

Pleistoceno superior (Sistema III) e Holoceno (Sistema IV), semelhantes aos sistemas reconhecidos no Rio Grande do Sul (Villwock et al., 1986) (Figura 3), em ambiente marinho raso, eólico, lagunar e paludal, os quais, sucessivamente apresentam formas de relevo de terraços submarinos, dunas, cordões regressivos e planícies, conforme a estratigrafia geral da PCSC apresentada na Figura 4.

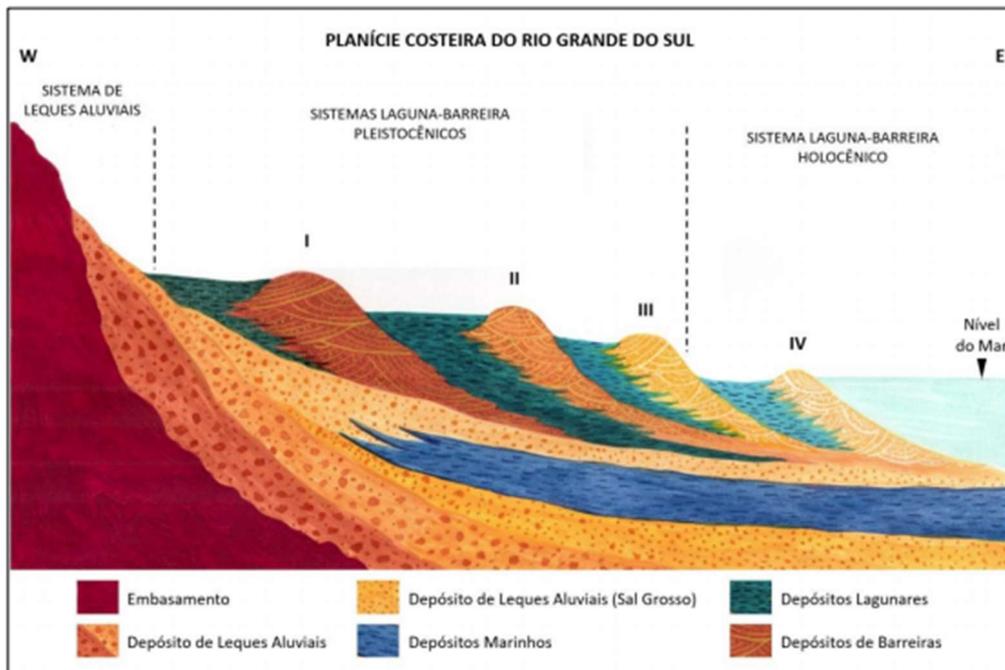


Figura 3. Corte esquemático mostrando a estrutura da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

Fonte: Collischonn, 2018. Desenhista Mariah Xavier Rocha (Modificado de Tomazelli & Villwock (2000)).

BACIAS DE SANTOS E PELOTAS				
Ambiente	Sistema	Idade	Depósito	Forma
Planície Costeira	Costeiro	Holoceno	Marinho	Terraço
		Quinário	Tecnógeno	Colina
		Holoceno	Marinho	Terraço
			Eólico Lagunar Paludial	Cordão Planície Duna
	Pleistoceno	Marinho Lagunar Eólico	Terraço Cordão Planície Duna	
Continental	Terciário e Quaternário Indiferenciado	Coluvial Leque Aluvial	Tálus Leque Canal Planície Barra	
EMBASAMENTO				

Figura 4. Estratigrafia geral da Província Costeira catarinense.

Fonte: Horn Filho (2003).

Os sedimentos da PCSC são recobertos parcial ou totalmente por depósitos eólicos na forma de dunas e mantos de aspersão, originados durante as fases regressivas marinhas. O campo de dunas eólicas que é objeto de estudo deste trabalho, encontra-se estratigraficamente no topo do Sistema IV, da sequência principalmente composta por depósitos do tipo laguna-barreira. Trata-se da exposição dos depósitos mais jovens do preenchimento da Bacia de Pelotas (Rosa *et al.* 2017). Na área de estudo, a planície costeira é uma unidade fisiográfica correspondente à porção terrestre da Bacia de Pelotas (Villwock 1984).

Horn Filho (2003), agrupou a PCSC em três setores: Norte, Central e Sul, definidos de acordo com as características fisiográficas, sendo a área de estudo, localizada no setor Central, próxima a divisa com o setor Sul (Figura 5). O setor Central é caracterizado por ser a região mais estreita da planície costeira, devido a ocorrência dos maciços rochosos que afloram na linha de costa. As praias no setor Central apresentam formas de arco (de bolso), devido aos altos do embasamento que limitam as zonas de praia, sendo definidas como praias de estágio modal intermediário, cuja classificação morfodinâmica de Short (1999), pode ser observada na Figura 6.

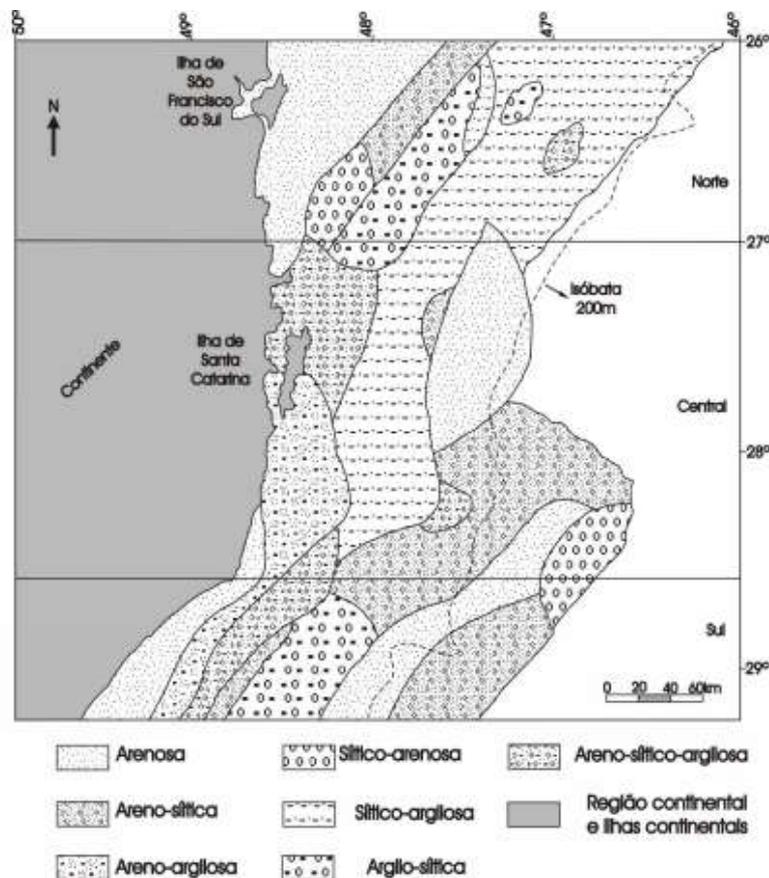


Figura 5 – Divisão setorial da Planície Costeira de Santa Catarina e sedimentos superficiais da plataforma continental catarinense.

Fonte: Horn Filho (2003) apud Corrêa et al., 1996 e Horn Filho (1997).

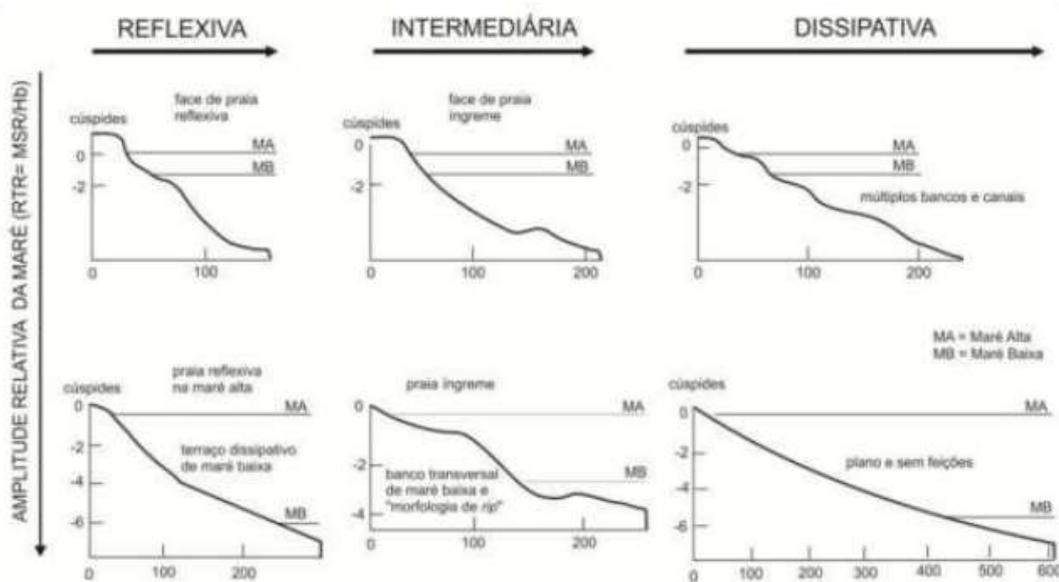


Figura 6. Classificação dos estados morfodinâmicos de praias definidos por Short (1999).
Fonte: SOUZA et al. (2005).

2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO CAMPO DE DUNAS

O transporte de partículas de areia no campo de dunas está relacionado a dois processos principais, o fluxo gravitacional, através da avalanche de areia pela sua face deslizante a sotavento (Figura 7- A e B), e o transporte através do fluxo eólico principalmente por saltação, conforme classificação de Zaroubin (2018), (Figura 8). Neste tipo de transporte, as partículas são lançadas da superfície da duna percorrendo uma trajetória balística, onde em seu retorno a superfície podem colidir com outros grãos fazendo com que estes sejam ejetados e impulsionados, gerando assim um efeito cascata (Figura 9). Pode haver também o transporte por rastejo para as partículas de maior granulometria, assim como a suspensão de partículas de areia muito finas, transportando estes grãos a uma longa distância. (Mckee 1979; Zaroubin 2018).

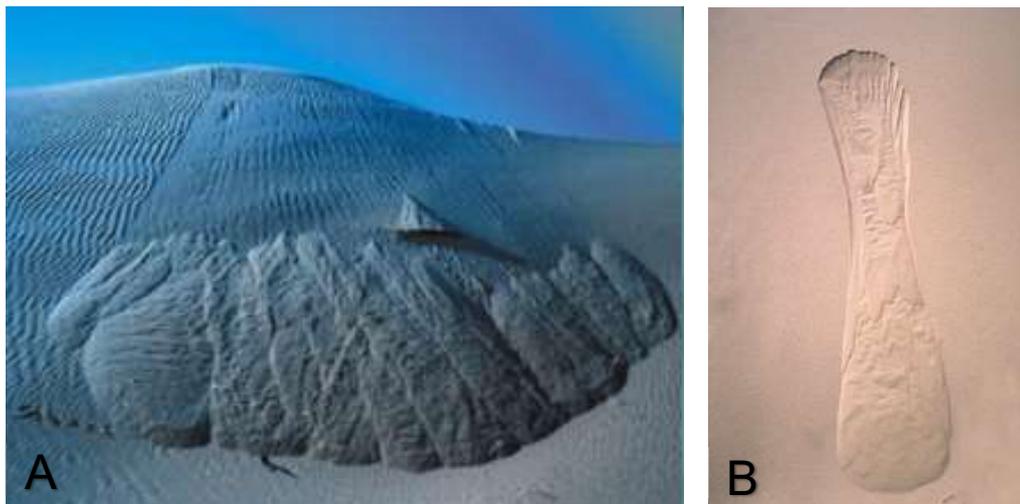


Figura 7 – Exemplos de fluxos gravitacionais em frente de dunas da região de Jaguaruna-Laguna (SC); A: Tipo de fluxo gravitacional intermediário entre o fluxo granular e o escorregamento de areia; B: Fluxo granular clássico. A extensão da língua de areia é de aproximadamente 20 cm.

Fonte: Decifrando a Terra. Fotos: P. C. F. Giannini

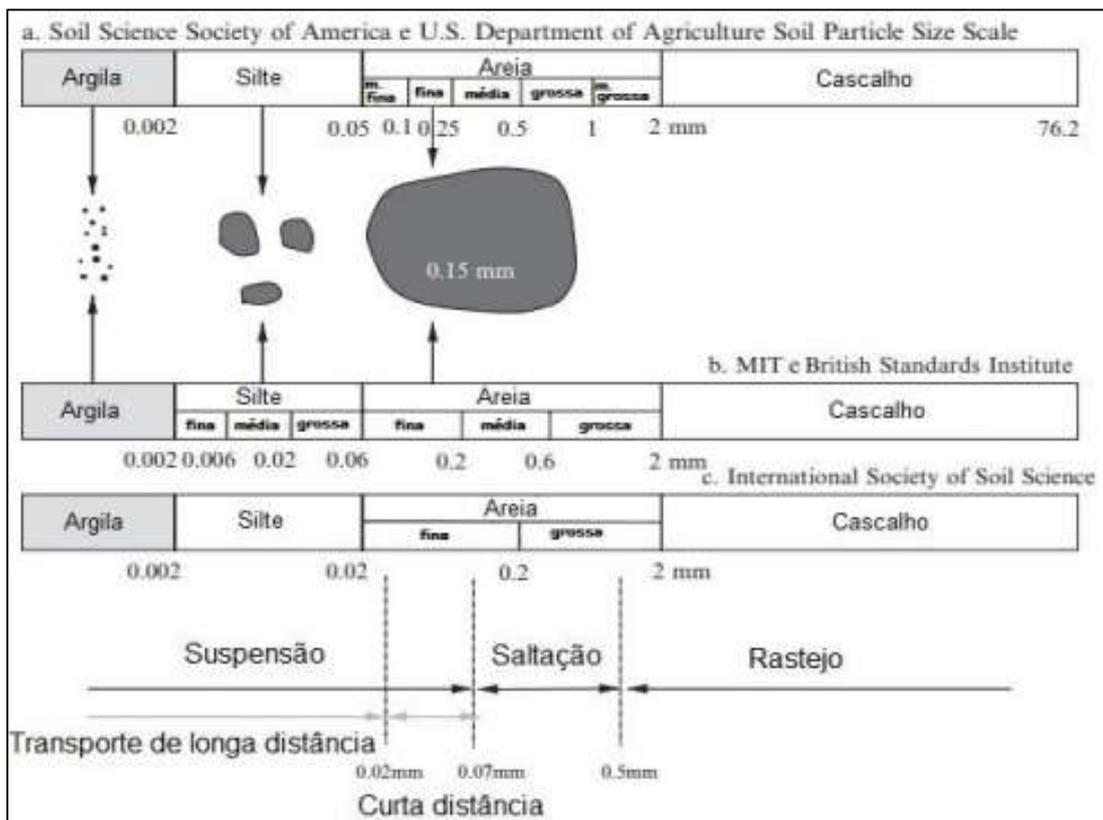


Figura 8. Classificação física do tamanho de grãos associados ao tipo de transporte predominante.

Fonte: Zaroubin (2018).

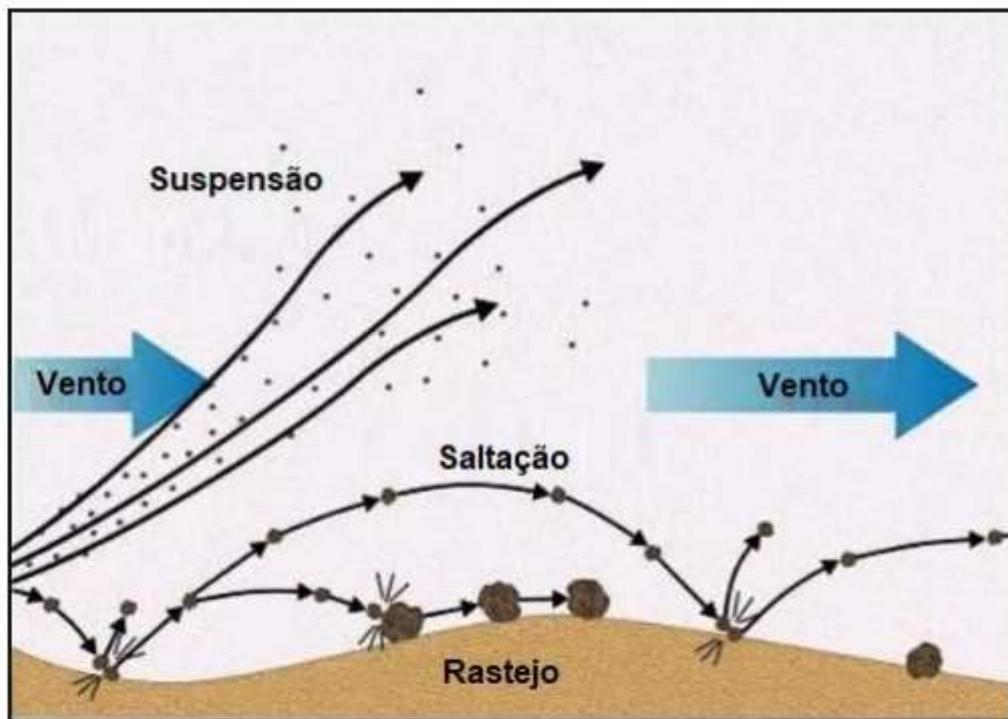


Figura 9. Tipos de movimento das partículas de areia em meio eólico.
Fonte: Zaroubin (2018).

Fryberger (1979), desenvolveu um método para calcular o potencial de transporte de areia pelo vento, conforme Equação 1. A partir desta é possível observar que a velocidade e o tempo de predominância do vento são fatores determinantes nos processos de migração do campo de dunas.

$$Q \propto V^2 (V - V_t) \cdot t \quad (1)$$

Onde Q (m^3/s) é a quantidade proporcional de areia transportada pelo vento em um determinado tempo t , V_t é velocidade média do vento a 10 m de altura (a altura padrão de registros nas estações meteorológicas), V é velocidade limite de impacto medida a 10 m de altura (velocidade mínima para manter a areia em saltação), t é tempo em que o vento soprou na direção considerada (registrado como percentagem nas estações meteorológicas).

Os valores encontrados na equação acima não são, necessariamente, proporcionais a deriva real, uma vez que as características locais inerentes a superfície do terreno sobre o qual o vento sopra podem afetar significativamente a quantidade de areia efetivamente transportada (variações topográficas da superfície, grau de umidade, tamanho dos grãos, presença de vegetação, etc.). Portanto, os valores de potencial de deriva devem ser interpretados como representativos do índice

da energia de vento disponível na região de estudo, cuja eficiência maior ou menor no transporte efetivo da areia vai depender das características locais da superfície sobre a qual o vento sopra.

2.2.1 Ventos com uma única direção dominante

O campo de dunas estabelecido em uma área onde o vento possui uma direção preferencial dominante, tende a apresentar morfologicamente dunas de cristas na forma de “crescentes”, orientadas de maneira perpendicular a direção do vento predominante, com faces deslizantes em uma única direção. Essas dunas variam em três tipos, desde as pequenas dunas barcanas, dunas de cristas barcanóides e dunas transversais de crista reta. Esses três tipos podem evoluir gradativamente em uma sequência definida, conforme o suprimento de areia disponível (Figura 10). Em geral, as dunas transversais se desenvolvem onde há grande quantidade de areia disponível, podendo ser difícil a distinção através de imagens de satélite, destas em relação as dunas de cristas barcanóides que formam padrões de cristas em linhas onduladas. Já as dunas barcanas, resultam de áreas de areia esparsa, ocorrendo espalhadas na superfície. No campo de dunas transversais e de cristas barcanóides, estas tendem a apresentar um padrão de linhas onduladas e paralelas, perpendiculares ao vetor unidirecional de incidência do vento. Outro tipo são as dunas compostas, representadas morfologicamente pela existência de dois ou mais tipos de dunas combinados em sobreposição, podendo excercer a forma de pequenas barcanas nos flancos de cristas barcanóides, dunas barcanas coalescendo, entre outras combinações (Mckee, 1979).

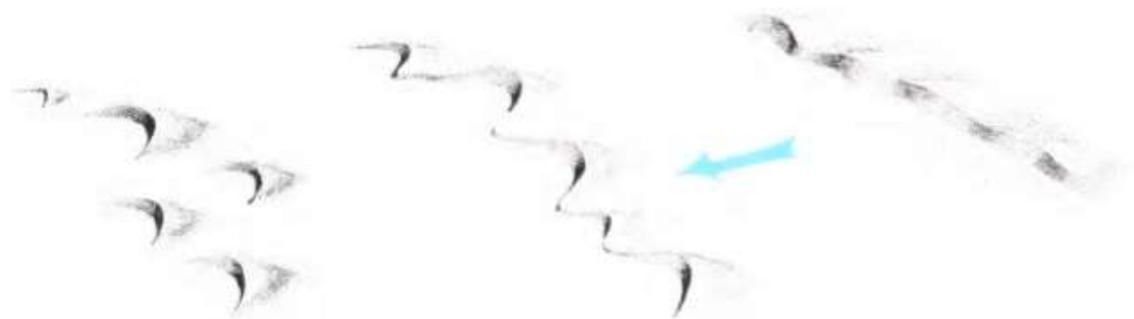


Figura 10. Sequência dos tipos de dunas com ventos unidirecionais, gradando da direita para a esquerda, de dunas transversais, cristas barcanóides a dunas barcanas.

Fonte: Mckee (1979)

2.2.2 Obstáculos que impedem o avanço das dunas

Segundo Mckee (1979), muitas dunas de áreas costeiras provavelmente têm suas formas controladas mais pela umidade e vegetação do que pela força do vento. Uma classe de dunas em que as formas aparentemente são controladas mais por estabilização parcial de vegetação, umidade ou ambos, são caracterizadas como *blowout* e dunas parabólicas. Tais dunas podem ter rampas inclinadas em uma ou várias direções, dependendo de quais partes de suas faces são livres para migrar. O tipo *blowout* (Fig. 11A) é normalmente uma tigela circular, enquanto o parabólico desenvolve uma forma de U ou em forma de V dos braços ancorados e do nariz que migra na direção do vento (Figura 11B).

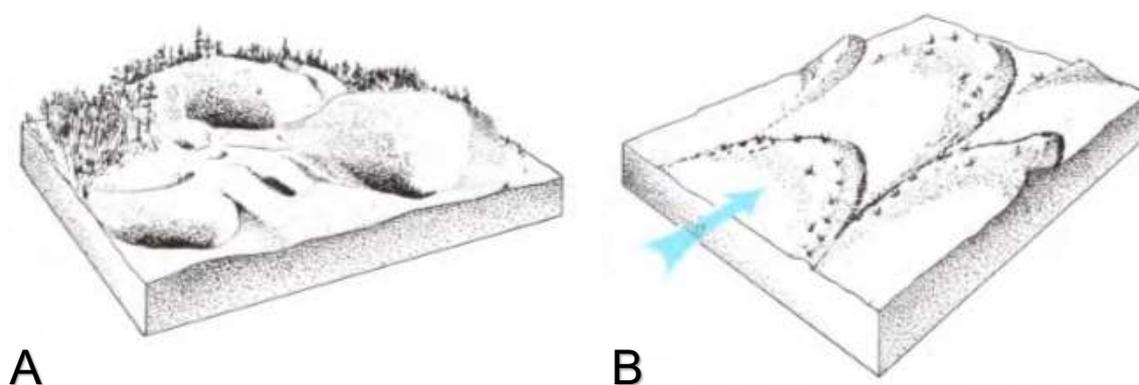


Figura 11. Dunas controladas pela estabilização parcial de vegetação A: Dunas tipo Blowout; B: Dunas Parabólicas.

Fonte: Mckee (1979)

2.2.3 Ventos de direções variadas

A morfologia do campo de dunas pode variar de formas distintas onde os ventos incidem de várias direções (Figura 12), sendo descritas como: (A) dunas lineares, caracterizadas por cristas retas com faces corrediças em ambos os lados; (B) dunas estrela, de múltiplas faces com um pico central alto e três ou mais braços estendidos radialmente; (C) dunas reversas, de caráter intermediário entre a duna estrela e a de crista transversal, se forma onde os ventos de direção quase oposta são equilibrados em relação a força e duração.

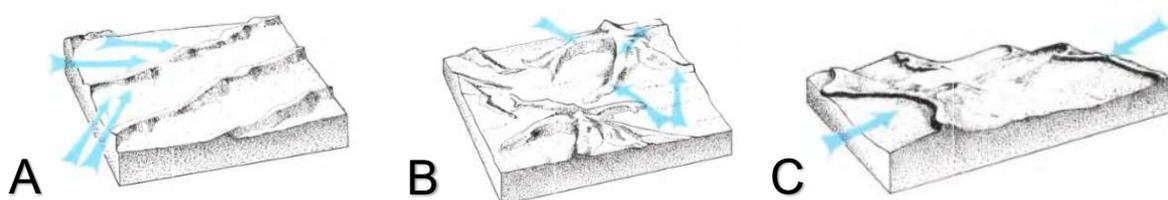


Figura 12. Variação morfológica conforme a direção dos ventos; A: Dunas lineares de cristas retas; B: Dunas estrela; C: Dunas reversas.

Fonte: Mckee (1979).

2.3 PROCESSO DE MIGRAÇÃO DE DUNAS LIVRES

Gardner (1955), Hesp & Thom (1990) e Tomazelli *et al.* (2008) salientam que as dunas eólicas, presentes nos campos transgressivos costeiros e não vegetados são progressivamente alimentadas por areias proveniente do sistema praial que através da força dos ventos migram para o interior da costa recobrando ou “transgredindo” terrenos mais antigos. Conhecidas na literatura como dunas livres, tem como características principais a ausência de vegetação, que permite a migração através dos processos deposicionais de avalanche, como os fluxos de grãos, que ocorrem em sua face de deslizamento (Bagnold, 1941), e também através do transporte por saltação." . O conceito de campo de dunas transgressivo não deve ser confundido com a transgressão da linha de costa, uma vez que os fatores que controlam os processos de formação e migração das dunas são, a princípio, independentes dos que controlam o deslocamento da linha de costa. O que caracteriza a propagação das dunas é principalmente a sua mobilidade no sentido do continente, que independe do sentido de deslocamento lateral da linha de costa.

2.4 PREDOMINÂNCIA DOS VENTOS E OUTROS FATORES CLIMÁTICOS

Giannini (1993) descreveu o clima na região estudada com base na classificação de Koppen (1948) *apud* Monteiro (1958), como Subtropical úmido mesotérmico, e as médias meteorológicas inferidas por Orselli (1986), como umidade relativa de pouco menos de 85%, com 120 dias/ano de chuva e taxa de precipitação de 1400 mm/ano que associam-se de modo preferencial a atuação de ventos fortes > 5 m/s nos quadrantes SW e SE que também atesta o avanço da massa de ar polar para o norte. O presente autor também infere que o clima, além de definir o regime de ventos e ondas que controlam a intensidade e orientação das derivas eólicas e litorâneas, influencia na sedimentação costeira regional por meio de perturbações episódicas onde são observadas um aumento temporário anômalo de pluviosidade.

Referente a análise da predominância dos ventos no município de Laguna (SC), região adjacente a área de interesse deste trabalho, o autor salienta que:

A observação em campo e aerofotografias da posição de faces de avalanche permanentes, frentes de dunas parabólicas e rastros residuais de deflação permite confirmar, para a área em estudo, a associação teórica entre ventos prevaletentes (de NE) e a formação de dunas eólicas. (Giannini, 1993, p.74)

2.5 OCUPAÇÃO ANTRÓPICA

Para o entendimento da influência da ocupação antrópica dentro do domínio do campo de dunas costeiro, pode se observar fotografias aéreas e imagens de satélite do município de Cidreira (RS) e arredores, analisados por Tomazelli *et al.* (2008), as quais revelam que a maior parte do campo eólico existente está em processo acelerado de extinção, com um alto nível de ocupação antrópica (Figura 13 – A e B), sendo a região de Cidreira localizada ao sul da área deste estudo, cujo a linha de costa apresenta diferenças fisiográficas, porém o mesmo sistema deposicional do tipo laguna-barreira e também uma influência do regime de ventos semelhante. O processo de urbanização pode afetar os campos eólicos de forma direta ou indireta, sendo as obras urbanas que ocupam o mesmo espaço físico das dunas a forma direta; e o cancelamento da fonte de alimentação, como forma indireta.

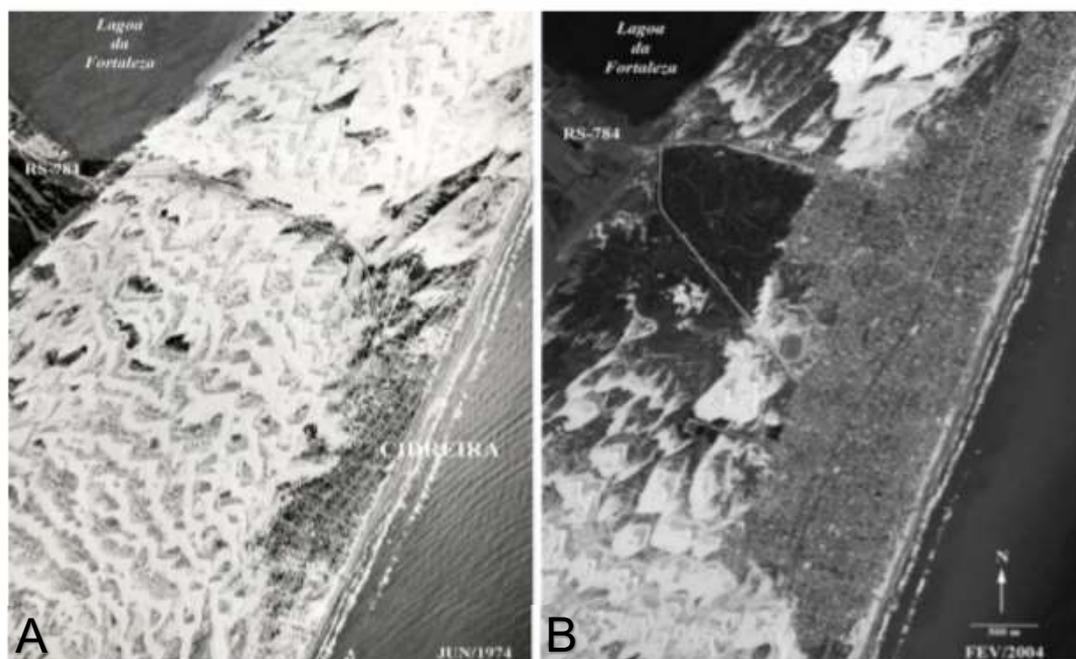


Figura 13 – Fotografias aéreas verticais das cidades de Cidreira e arredores; A: Fotografia aérea do ano de 1974; B: Fotografia aérea do ano de 2004, evidente redução do campo eólico em relação ao avanço da urbanização.

Fonte: Tomazelli et al. (2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme representado no fluxograma (Figura 14), o procedimento para a elaboração da pesquisa consistiu na revisão bibliográfica durante todas as etapas do projeto. Essa revisão auxiliou na tomada de decisão para a execução da etapa de levantamento de dados, na qual, foram resgatadas fotografias aéreas da região, datadas do ano de 1957; também foram prospectadas imagens de satélite do período recente entre os anos de 2009 e 2020 e imagens aéreas recentes do ano de 2020, adquiridas com um veículo aéreo não-tripulado (VANT), sendo estas últimas, utilizadas para a construção do ortomosaico, o qual, era um dos objetivos iniciais do projeto. Contudo, em virtude da necessidade de distanciamento social, por conta da pandemia do Covid-19, não foi possível gerar o modelo completo devido à inacessibilidade do acesso aos laboratórios da universidade para o processamento de dados. A coleta de dados também envolveu a consulta ao banco de dados meteorológicos do INMET, de onde foram extraídas informações sobre a velocidade e orientação média dos ventos e níveis de precipitação, para a construção de gráficos e rosas dos ventos através do *software* WRPLOT e também com auxílio do Excel.

A continuidade do trabalho se deu com o georreferenciamento das fotografias aéreas e imagens de satélite no *software* QGIS, delimitando a área ocupada pelas dunas livres, planície de deflação, morfologia das dunas e áreas interduna, processo que será detalhado a seguir nos itens 3.1 e 3.2. Estes produtos cartográficos, relacionados aos dados meteorológicos para a análise dos resultados gerados, foram utilizados na interpretação acerca da dinâmica e taxa de propagação do campo de dunas.

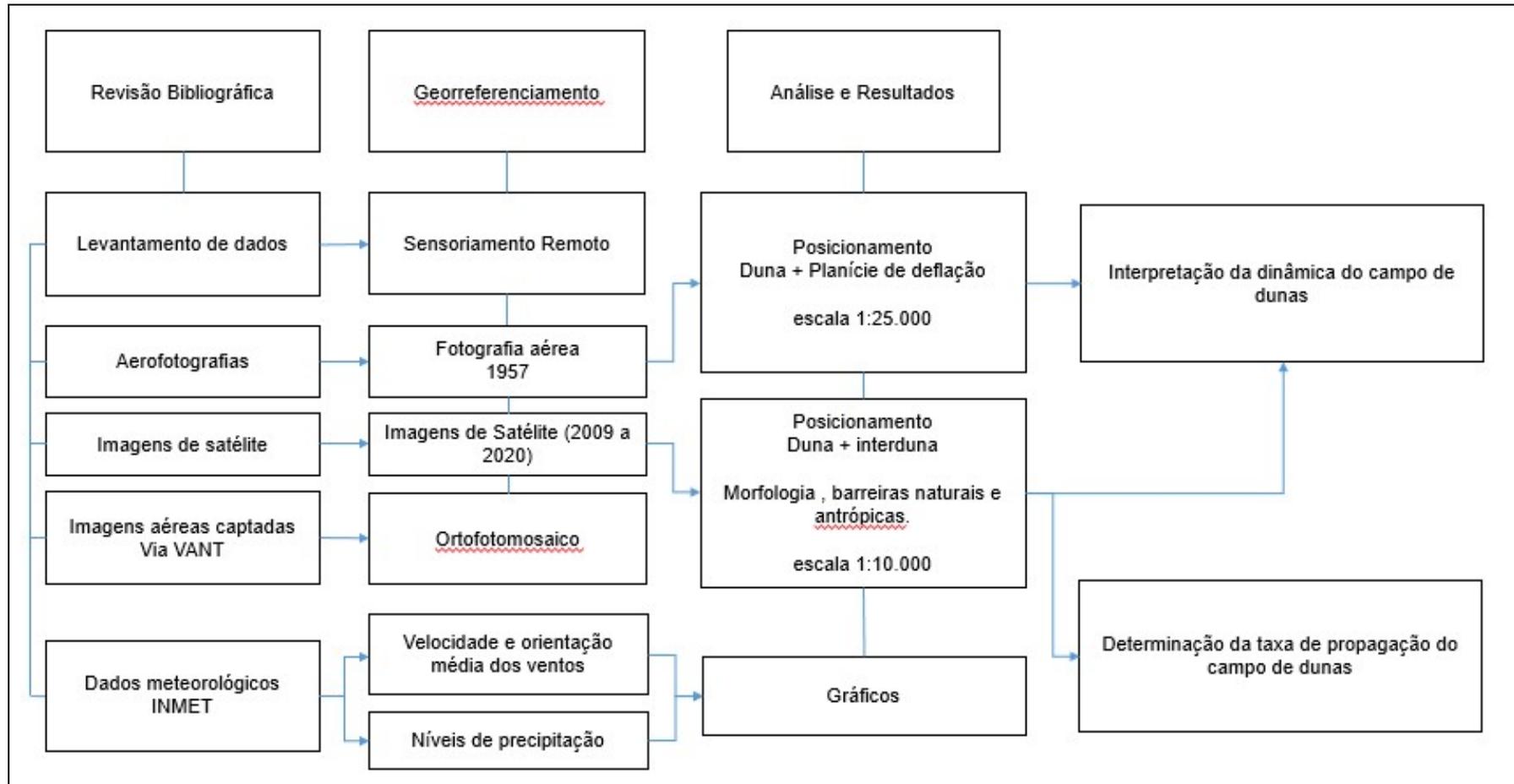


Figura 14. Fluxograma representando as etapas de desenvolvimento do projeto.

3.1 GEOPROCESSAMENTO DE AEROFOTOGRAFIAS

Primeiramente, é importante salientar que a fotografia e as imagens de satélite utilizadas foram georreferenciadas, mas não ortoretificadas, servindo, portanto para a caracterização qualitativa e quantitativa dos subambientes, podendo gerar variações métricas para o posicionamento do campo de dunas.

Foi utilizada fotografia aérea da área de interesse do ano de 1957, para o qual foi definida a área abrangente do campo de dunas, delimitado através do *software* QGIS, através da criação de uma camada vetorizada no formato *shapefile* onde a área do campo de dunas livres foi definida com base no contraste existente entre os sedimentos arenosos de tons claros e a planície de deflação estável e vegetada, de cores esverdeadas com tons de pixel mais escuros. Posteriormente foram criados mapas na escala 1:25.000 representando a sobreposição de imagem de satélite do ano de 2020, final do período de observação deste estudo, o que possibilitou a observação das modificações ocorridas com a área abrangente do campo de dunas, e a sua relação com a ocupação antrópica. O *software* QGIS também torna possível o cálculo da área dos polígonos vetorizados que delimitam o campo de dunas livres, os quais foram calculados para obtenção do valor de área do campo que foi subtraído no final do período em análise.

3.2 GEOPROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE

Foram extraídas imagens de satélite através do Google Earth Pro para o período de 2009 a 2020. Estas imagens foram selecionadas devido à resolução espacial e utilizadas na construção de mapas na escala 1:10.000, onde foram observadas e delimitadas as características morfológicas do campo de dunas e a parcela do perímetro do campo por onde ocorre o transportados sedimentos arenosos.

A interpretação e delimitação dos tipos de dunas foi realizada com base na forma das cristas, evidenciadas pelo contraste entre cores bebes claras e escuras que representam as faces de barlavento e sotavento. Na região interduna os tons de pixel são cores bebes ainda mais escuros, por vezes praticamente pretos, evidenciando a presença do acúmulo superficial de águas. O limite entre o campo de dunas livres e a planície de deflação, assim como o procedimento realizado no *software*, foram descritos conforme consta no item anterior (item 3.1). Foram gerados mapas de

representação dos aspectos morfológicos e de propagação para cada uma das imagens utilizadas. Através da sobreposição de mapas, é possível observar a taxa de migração da região frontal do campo de dunas e analisar qualitativamente as modificações morfológicas ocorridas. Essas características serão relacionadas a períodos de maior umidade no sistema, e ao sentido e velocidade das correntes eólicas, que serão discutidos a seguir no item 3.3.

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS CLIMÁTICO

Através de pesquisa ao banco de dados do INMET, utilizando como referência a estação meteorológica automática do Farol de Santa Marta (A866), foi obtido o histórico de registros dos índices de precipitação, direção e velocidade dos ventos, com intervalos diários de hora em hora para o período correspondente a onze anos (2009 a 2020). Os dados obtidos correspondem às datas de registro das imagens de satélite e também para os anos em que não houveram registros de imagens de satélite, considerando períodos entre as estações de verão, outono, inverno e primavera, através dos quais foram analisados o sentido e a velocidade impressa pelos ventos para as estações do ano dentro do período de interesse, com a construção de gráficos de precipitação construídos através do Excel e gráficos do tipo rosa dos ventos que foram gerados com o auxílio do *software* WRPLOT, auxiliando na correlação entre as épocas de maior umidade relativa com a taxa de mobilidade e direção predominante do campo de dunas.

3.4 ANÁLISE DE DADOS

Posteriormente ao geoprocessamento das imagens, geração de mapas e gráficos de precipitação e rosas dos ventos foi realizada a análise para estabelecer a relação entre o clima, a morfologia existente no campo de dunas e a taxa de migração do campo para os últimos onze anos (2009-2020), buscando identificar fatores comuns para o comportamento do campo em cada período analisado e a sua relação com as estações do ano.

3.5 LEVANTAMENTO DE DADOS COM VANT

A proposta inicial desta etapa do projeto, era gerar quatro modelos digitais de superfície, um para cada estação do ano e, posteriormente, analisar as modificações morfológicas ocorridas ao longo do período de 1 ano (2019 – 2020) em uma escala com alto nível de detalhe de 1:3.000. Porém, devido a motivos decorrentes da pandemia do Covid-19, os três campos restantes para o levantamento de dados não puderam ser realizados, assim como também não pode ser executado o processamento completo dos dados já coletados, devido à necessidade de isolamento social. Por isso, esta etapa do projeto ficou restrita à geração de apenas um bloco do ortofotomosaico que poderá ser finalizado e utilizado para o desenvolvimento de projetos futuros.

3.5.1 Levantamento de dados em campo

As imagens aéreas foram captadas em 06 de fevereiro de 2020, por meio de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), com câmera acoplada, modelo Phantom 4 da marca DJI (Figura 15 A). A área a ser levantada possui cerca de 500 m². Devido ao tamanho da área, o levantamento das imagens foi realizado em quatro blocos, cada qual correspondente a um plano de voo. Também foram coletados coordenadas de pontos de controle (GCP) com a utilização de *targets* (Figura 15 B) utilizados como referência para a captura de coordenadas em solo, posteriormente atreladas às imagens aéreas e utilizadas para o alinhamento da posição do modelo durante o processamento. A coleta das coordenadas foi feita no centro dos pontos de controle em solo e de forma a ter uma precisão muito grande para que o mapa seja efetivamente calibrado. Para a coleta das coordenadas utilizamos um GPS RTKGNSS com correção em tempo real – RTK da marca Stonex, modelo S8+ (Figura 15 C).

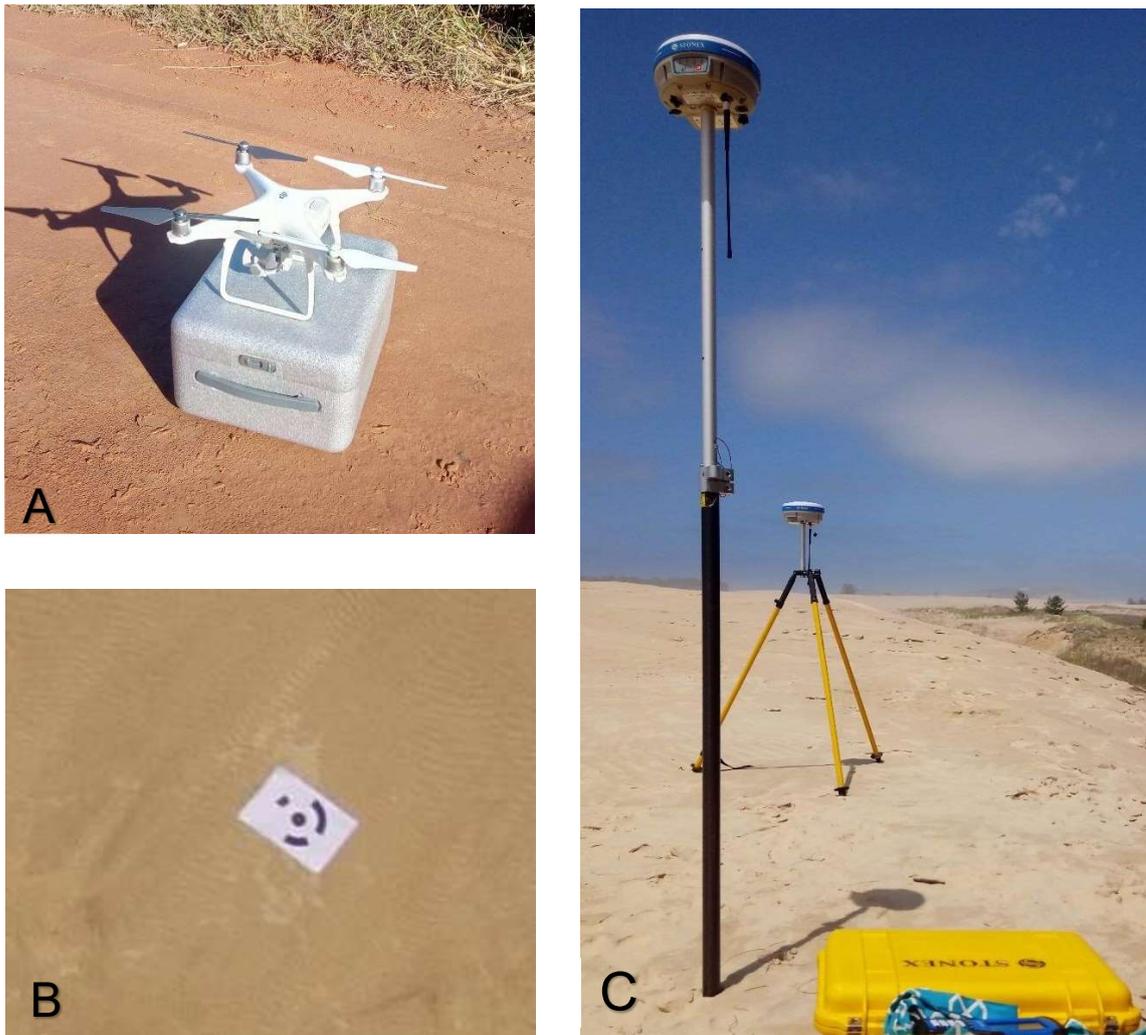


Figura 15 –A: Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), com câmera acoplada, modelo Phantom 4 da marca DJI; B: Fotografia aérea capturada através do VANT onde é possível observar um dos alvos do GCP; C: Base do GNSS RTK ao fundo e antena para a coleta de pontos de controle (GCP) a frente.

3.5.2 Processamento de imagens

O processamento das imagens foi feito através do software Agisoft Metashape 1.6.3. A confecção do ortofotomosaico, segundo Tavani *et al.* (2014), se dá através de quatro etapas: alinhamento das fotos, construção da nuvem densa de pontos, triangulação e texturização.

As etapas são descritas detalhadamente por Guadagnin *et al.* (2018). Primeiramente, as fotos são alinhadas. Este processo se dá através do reconhecimento da posição de pontos iguais em imagens sobrepostas. Assim, o *software* reconhecerá a posição e orientação das fotos. Após o alinhamento das fotografias, é gerada uma nuvem de pontos densa. Os pontos que compõem a nuvem

são unidos por um processo chamado de triangulação, gerando uma malha de triângulos irregulares. Por fim é feita a texturização, que consiste em reconstruir a textura sobre a malha triangulada. Neste estágio o programa associa as coordenadas U e V de cada vértice dos triângulos da malha criada, aos pontos de mesma coordenada nas fotografias. A textura da foto é então colada no triângulo correspondente.

3.6 PONTOS CRÍTICOS E VULNERABILIDADES

Devido à utilização de fotografias aéreas georreferenciadas, porém não ortorretificadas, a delimitação do campo de dunas para os anos de 1957 se torna imprecisa, mas mesmo assim podemos obter um dado qualitativo significativo.

A disponibilidade das imagens de satélite é baixa, não contemplando todos os anos correspondentes ao período de 2009 a 2020, o que dificulta a amarração dos dados e o entendimento da dinâmica das transições no posicionamento e morfologia do campo de dunas. Neste caso, os períodos “invisíveis” através das imagens, serão interpretados por modelos gráficos através dos dados climáticos.

Para executar o georreferenciamento das imagens de satélite, é preciso tomar muito cuidado ao escolher os pontos de controle de coordenadas da área. Por se tratar de um campo de dunas ativo, o ambiente de estudo é muito dinâmico e com poucos pontos de referência que permaneçam estáticos ou que não foram soterrados durante os anos. Este processo requer uma análise cuidadosa. O georreferenciamento mal executado pode acarretar na distorção dos dados referentes à sobreposição de mapas, delimitação e determinação das taxas de propagação do campo de dunas.

4. RESULTADOS

Através da análise dos dados meteorológicos, com ênfase nos índices de precipitação, velocidade e direção dos ventos, foram realizadas observações com a tentativa de correlacionar estes registros com as modificações morfológicas do campo de dunas observadas através de imagens de satélite. Essa correlação, se dá a partir do estabelecimento de critérios que determinam a capacidade do vento de transportar sedimentos a determinadas velocidades; como a morfologia do campo de dunas responde a incidência da direção predominante dos ventos; e a taxa de mobilidade do campo para cada estação do ano.

4.1 VELOCIDADE E DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS

Os dados meteorológicos da Estação Automática A866, localizada no Farol de Santa Marta, foram utilizados como base para a análise da distribuição de frequência da velocidade e direção dos ventos para cada estação do ano no período dos últimos onze anos. A rosa dos ventos (Figura 16), representa o comportamento do vento com base na direção de incidência e o percentual para cada classe de velocidade, sendo estas, definidas a partir da escala de Beaufort. A representação, demonstra que os ventos de direção NE e NNE, são predominantes durante todas as estações, sendo a maior incidência observada entre a primavera e o verão (A e B). Os ventos de direção SW também ocorrem durante todo o ano em menor percentual, sendo os registros de maior influência durante o outono e inverno em decorrência do avanço das massas polares (C e D).

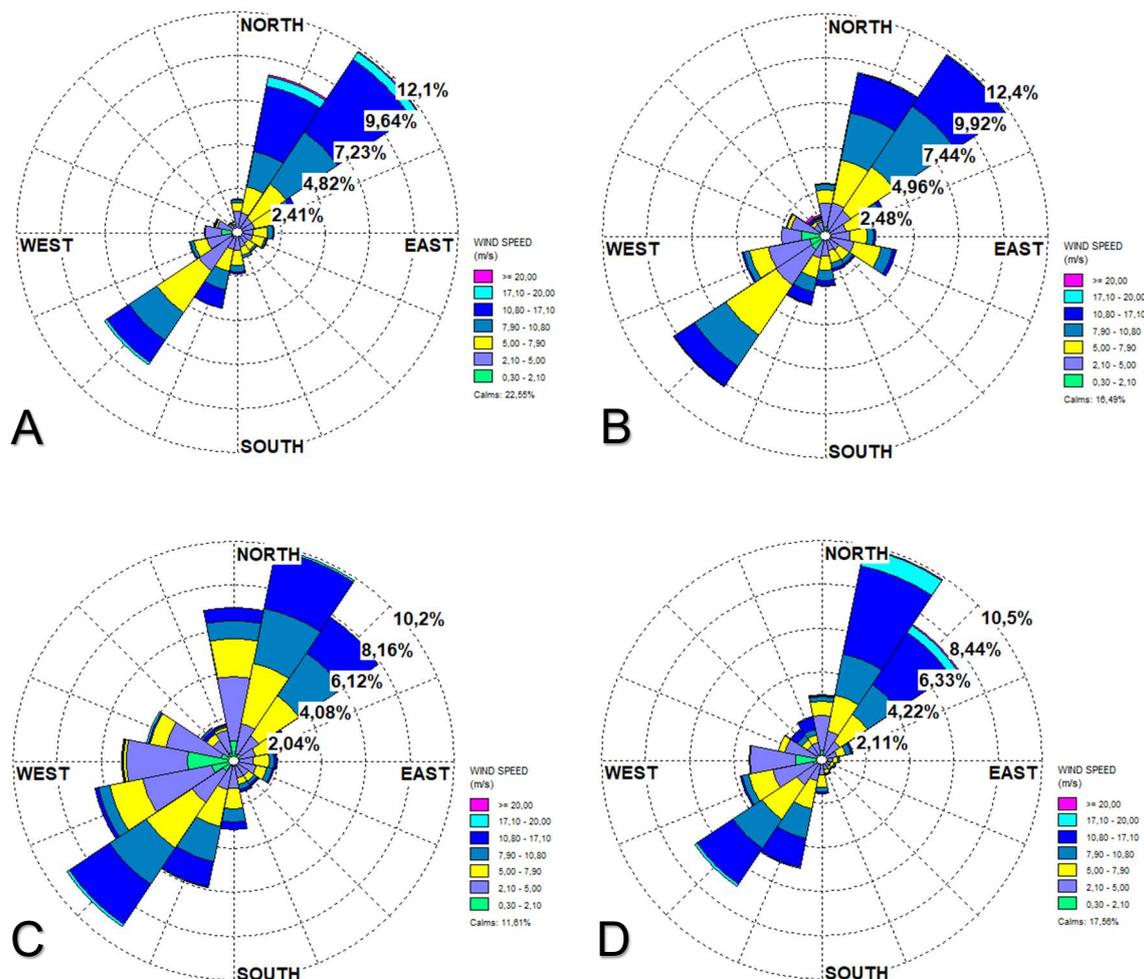


Figura 16. A: Rosa dos ventos para a primavera; B: Rosa dos ventos para o verão; C: Rosa dos ventos para o outono; D: Rosa dos ventos para o inverno.

Por serem predominantes, os ventos de direção NE, NNE foram analisados com base nos dados de distribuição de frequência obtidos através dos registros das classes de velocidade dos ventos. Para esta análise, foram consideradas as classes de velocidade do vento acima de 5 m/s, por se tratarem da velocidade mínima para manter sedimentos de grão de areia fina em saltação, conforme estabelecido por Tomazelli (1993), para as dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul. O gráfico gerado (Figura 17), demonstra que estações de primavera e verão, possuem o maior percentual de taxas acima de 5m/s para os ventos de NE e NNE, com um percentual expressivo de taxas entre os intervalos de classe 7,9 - 10,90 e 10,8 - 17,10 m/s para estes períodos, como é possível observar na Figura 16 (A e B). De forma geral, a razão entre os percentuais das taxas para os ventos SW, NE e NNE, demonstram que para os períodos de outono e inverno, há uma influência maior dos ventos de sentido SW, por vezes, com um percentual expressivo para SSW e WSW, Figura 16(C e D).

Tendo em vista que a capacidade de transporte da areia pelo vento inicia-se a taxa de 5 m/s, e a direção predominante dos ventos durante todo o período de análise é NE/NNE, é proposto que nos períodos de verão e primavera, a propagação do campo de dunas se torna mais intensa.

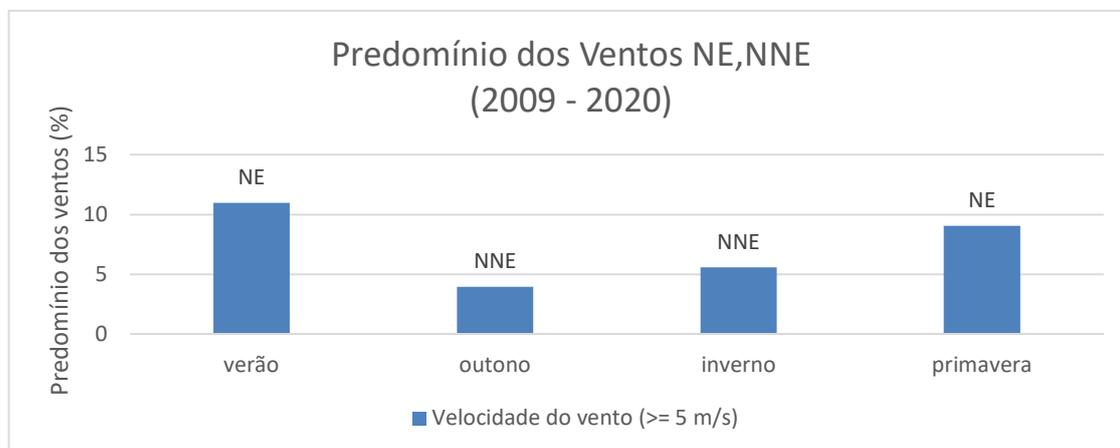


Figura 17. Distribuição de frequência dos ventos predominantes com velocidades acima de 5m/s .

4.2 ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO

Com base nos registros de precipitação do INMET, foram analisados os índices anuais ao longo dos anos de 2009 até 2020, período correspondente a análise das imagens de satélite. O gráfico representa um índice de chuvas bem distribuídas ao longo dos anos nesta última década (Figura 18). A média anual de precipitação observada foi de 1.255,4 mm/ano ao longo dos últimos onze anos, com valores acima de 104,61mm/mês para os meses de janeiro, março, abril, maio e setembro, sendo o final do mês de março, os meses de abril, maio, e a maior parte do mês de setembro, correspondentes ao período de regência das estações de outono e inverno. Essa observação sugere maior umidade no sistema do campo de dunas durante estas estações.

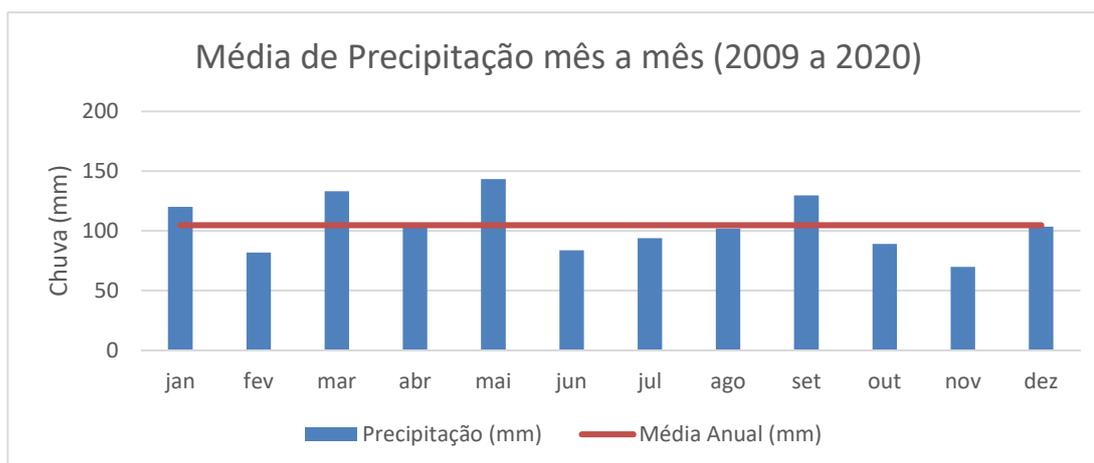


Figura 18 – Distribuição da precipitação ao longo dos anos de 2009 a 2020.

4.3 DISPOSIÇÃO GERAL DO CAMPO DE DUNAS E OCUPAÇÃO ANTRÓPICA

Através da observação das imagens de satélite e da fotografia aérea, considerando um período de 63 anos, pode se observar que existe uma diminuição da área de abrangência do campo de dunas, onde ocorre uma predominância maior da área do campo de dunas no ano de 1957 (Figura 19), ocupando uma área estimada em 3,42 km². Em relação ao ano de 2020 (Figura 20), a área estimada para a ocupação do campo de dunas é de aproximadamente 1,75 km². Na Figura 21, temos a sobreposição das imagens, onde é possível observar o efeito da diminuição do campo, estimado em aproximadamente 1,67 km². Outro fator importante é o surgimento e evolução da ocupação antrópica sobre o campo de dunas e a presença de dunas vegetadas em áreas antes ocupadas pelo campo de dunas livres, também identificadas na Figura 21.

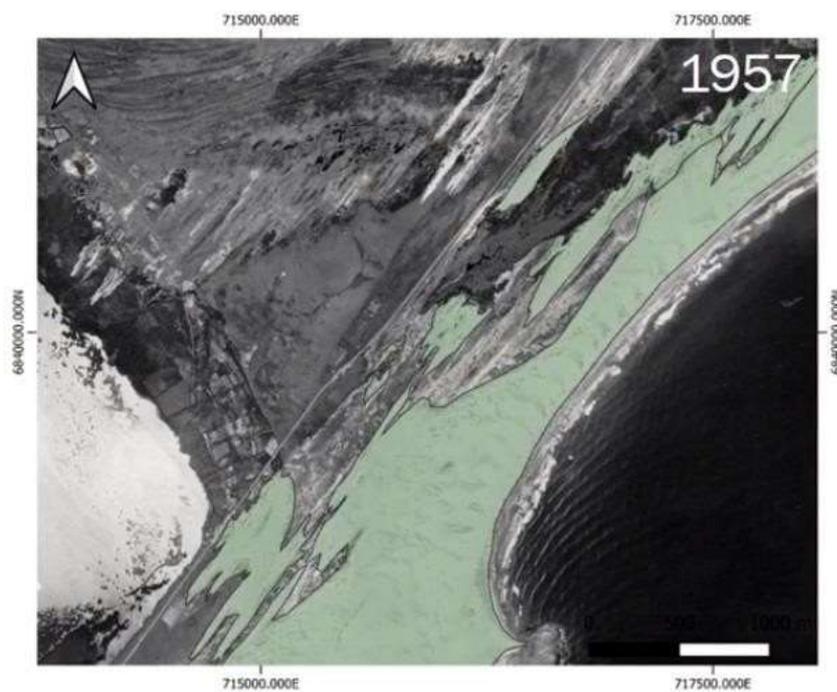


Figura 19. Fotografia aérea do ano de 1957 georreferenciada. Destaque para a delimitação do campo de dunas.



Figura 20. Imagem de Satélite de 2020 (Google Earth) georreferenciada. Sobreposição do campo de dunas no ano de 1957 e 2020.

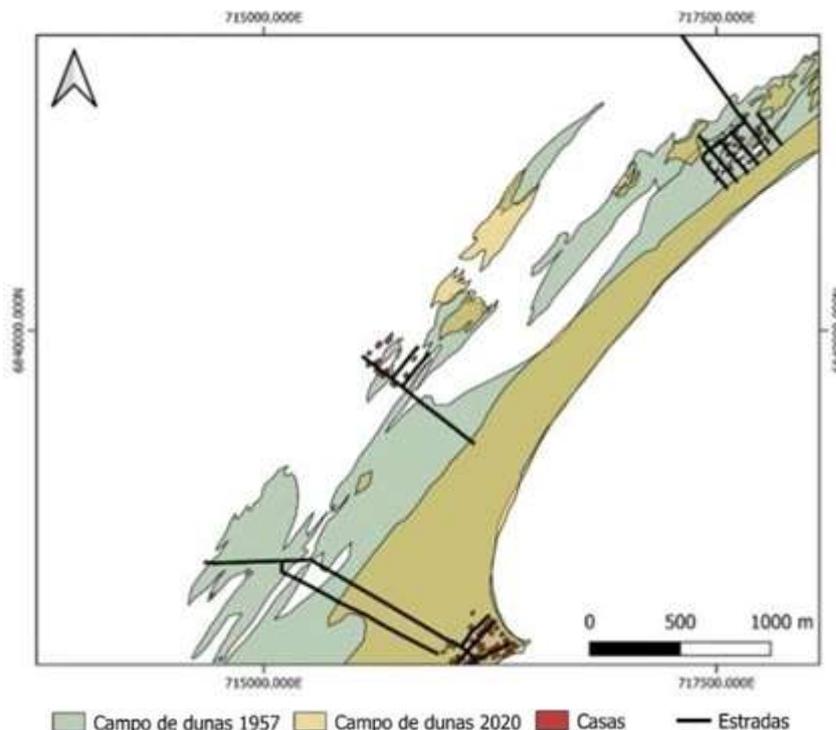


Figura 21. Sobreposição do campo de dunas no ano de 1957 e 2020. Delimitação de estradas e residências existentes no ano de 2020.

4.4 DINÂMICA DO CAMPO DE DUNAS E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

Entre os anos de 2009 e 2020, analisando o campo de dunas livres em uma escala de maior nível de detalhe, observa-se mudanças morfológicas significativas quanto ao deslocamento do seu perímetro a SW e, também, quanto a morfologia das dunas e da área interduna. No inverno de 2009 (Figura 22), são predominantes as dunas transversais. Já para a primavera de 2011 (Figura 23), o campo é dominado por dunas compostas, correspondentes a dunas barcanas coalescendo sobre as cadeias barcanóides. Na Figura 24, é feita uma comparação entre os dois anos citados acima, onde nota-se o aumento do aporte sedimentar do campo de dunas para 2011, e um pequeno avanço parcial do campo de dunas no sentido SW, o que era esperado devido a predominância dos ventos NE, NNE.



Figura 22. Delimitação do perímetro de propagação do campo e Dunas Transversais.



Figura 23. Delimitação do perímetro de propagação do campo e Dunas Compostas

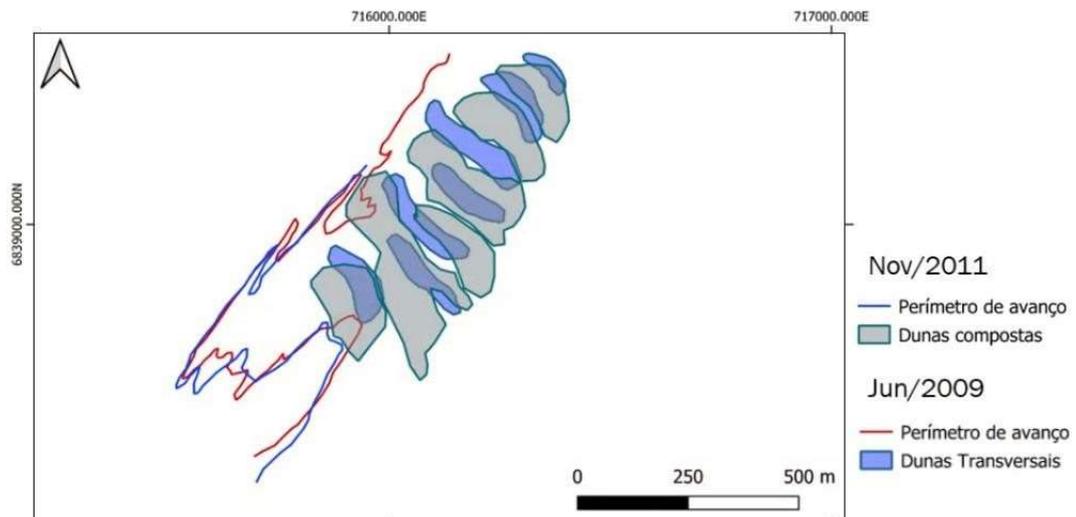


Figura 24. Sobreposição de períodos para comparação morfológica e análise da propagação da linha de frente do campo.

Para o ano de 2013, obteve-se registro da estação de inverno e verão, onde podemos observar as distintas características apresentadas pelo campo de dunas no período de um ano durante a transição de estações. Para o mês de Junho (Figura 25), é notável a presença de dunas barcanas coalescendo, com porções interduna bastante evidentes. No mês de novembro (Figura 26), o campo de dunas encontra-se praticamente dominado pela região interduna, onde a área está praticamente inteira transicionada para a forma de mantos de aspersão, impossibilitando a identificação e definição das cristas das dunas, podendo estar associada a eventos de tempestade.



Figura 25. Dunas barcanas coalescendo e região interduna bem desenvolvidas.

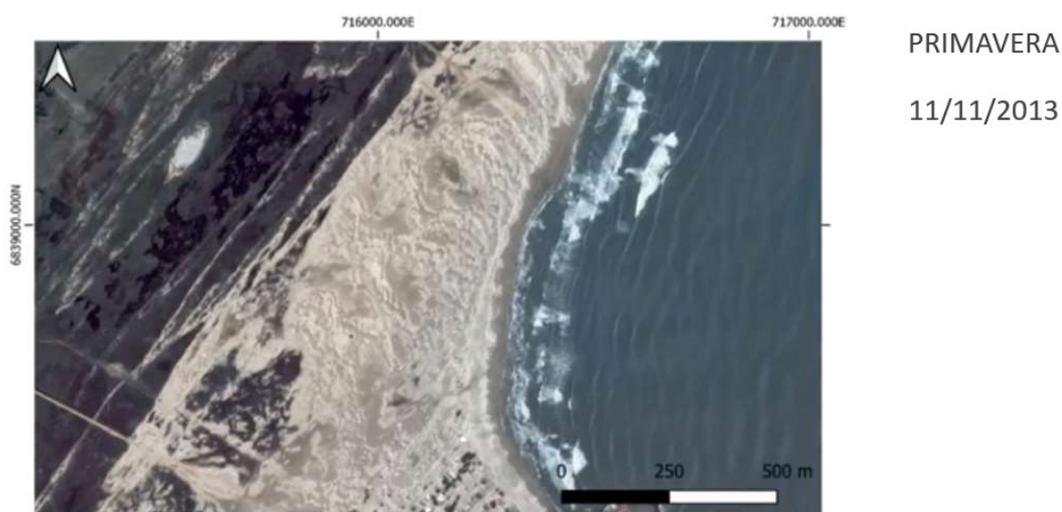


Figura 26. Campo de dunas em forma de manto de aspersão com provável associação a eventos de tempestade .

Para o ano de 2016, podemos perceber o retorno das dunas transversais e barcanóides, com uma região interduna evidente, além de um aumento do nível do lençol freático evidenciado pelo surgimento de áreas úmidas (Figura 27– A e B). No período de trinta dias anteriores a data do registro, foram precipitados 135,4mm que corresponde a um valor acima da média mensal de precipitação calculada. O mês de maio também é o de maiores valores de precipitação acumulada para a última década como demonstra a Figura 18.

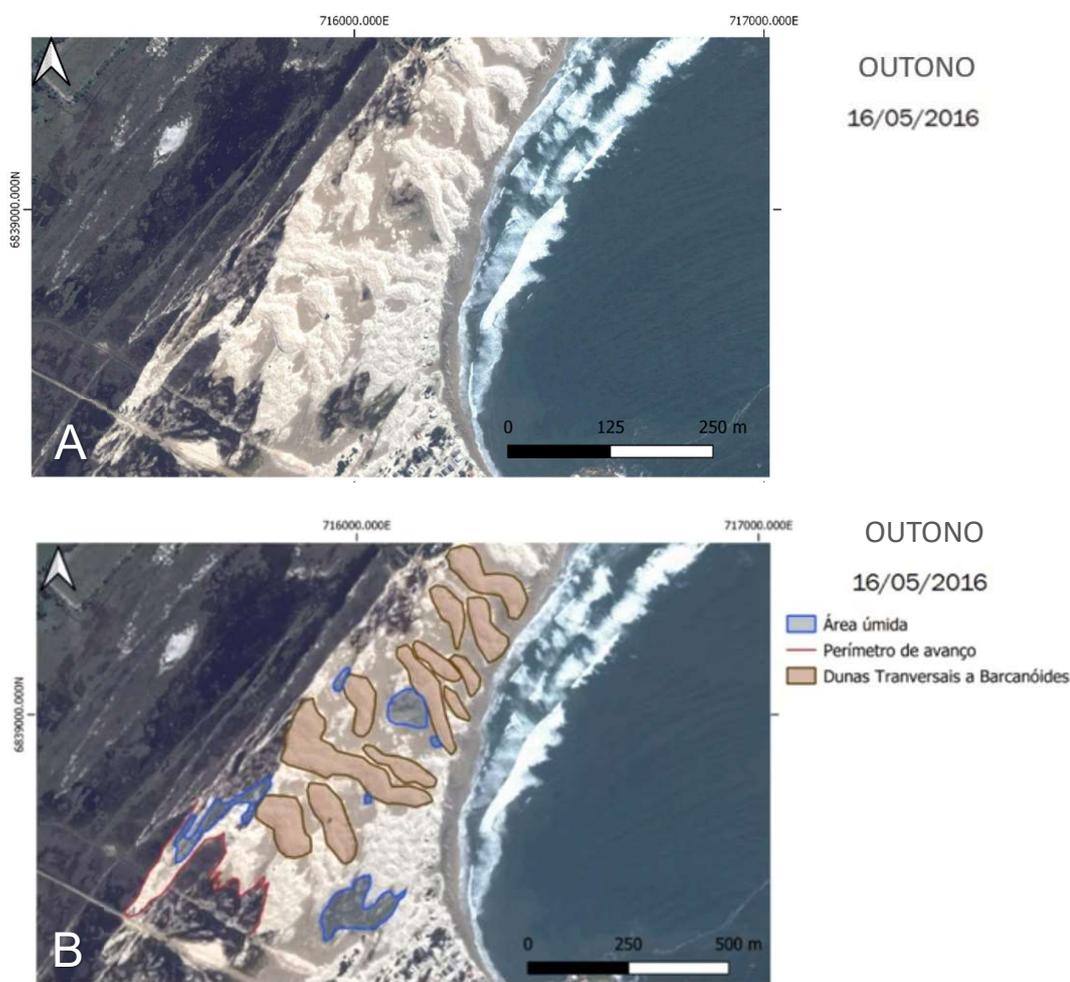


Figura 27. Campo de dunas registrando uma época de umidade elevada; A: Imagem de satélite da área de interesse; B: Imagem de Satélite da área de interesse com interpretações.

Para o verão do ano de 2017 em relação ao inverno de 2018, é perceptível a mudança de orientação das cristas de dunas transversais e barcanóides (Figura 28) e (Figura 29), podendo estar associadas a uma mudança no sentido de propagação do vento para as duas épocas distintas, com uma tendência maior à direção NE para o verão e NNE para o inverno (Figura 30) e (Figura 31), conforme observado também

no gráfico de distribuição dos ventos predominantes (Figura 17). O sentido de migração continua SW, com pequena variação para WSW, podendo ser observada pela orientação das setas (Figura 32).



Figura 28. Delimitação do perímetro de propagação do campo e dunas transversais a barcanóides.



Figura 29. Delimitação do perímetro de propagação do campo e dunas transversais a barcanóides.

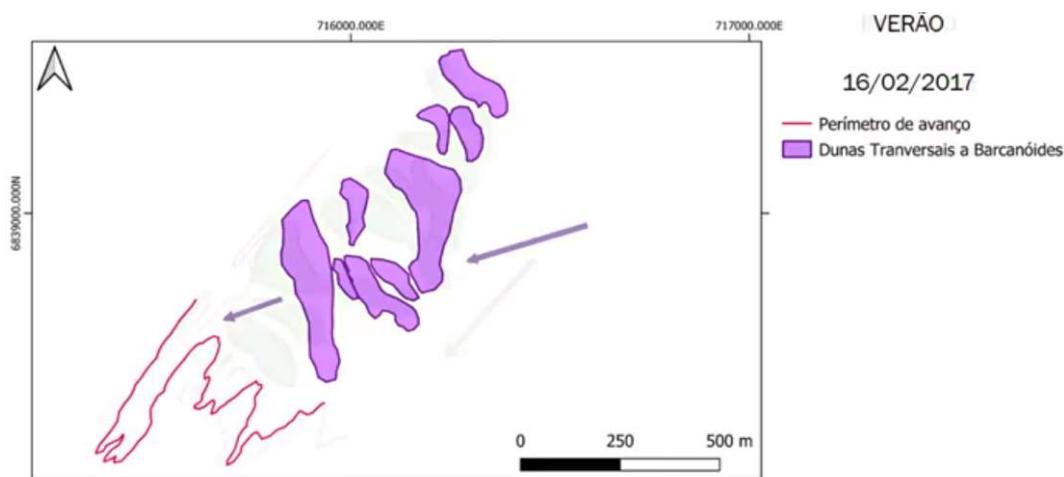


Figura 30. Delimitação do perímetro de propagação do campo, dunas transversais a barcanóides e sentido de propagação dos ventos.

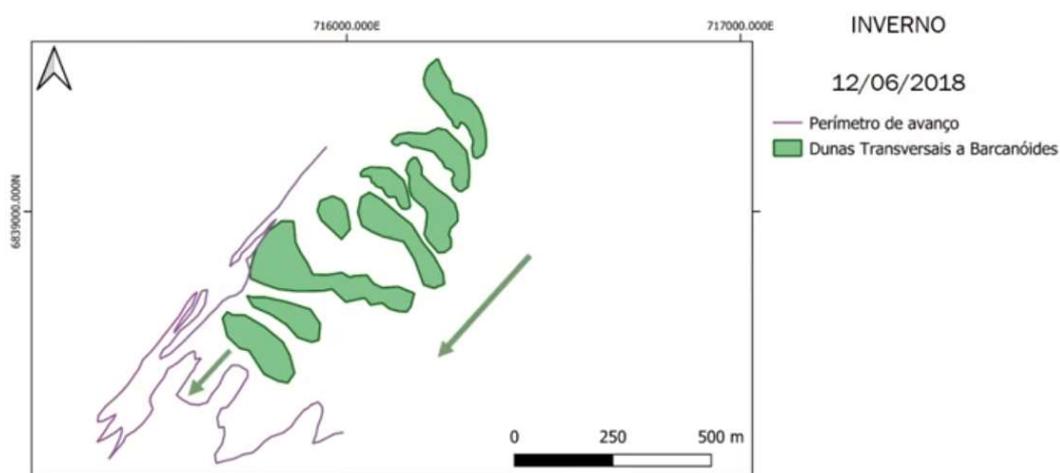


Figura 31. Delimitação do perímetro de propagação do campo, dunas transversais a barcanóides e sentido de propagação dos vento

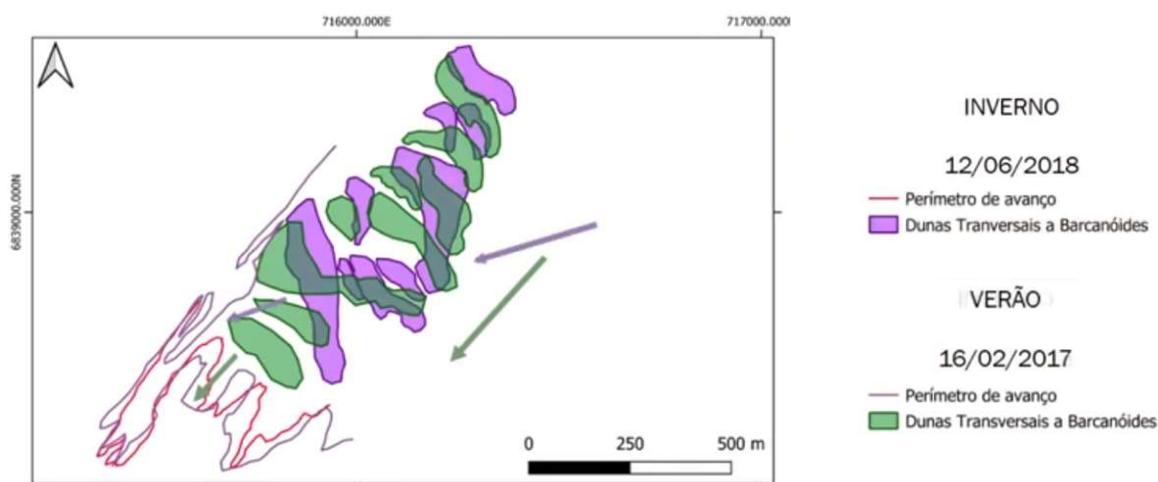
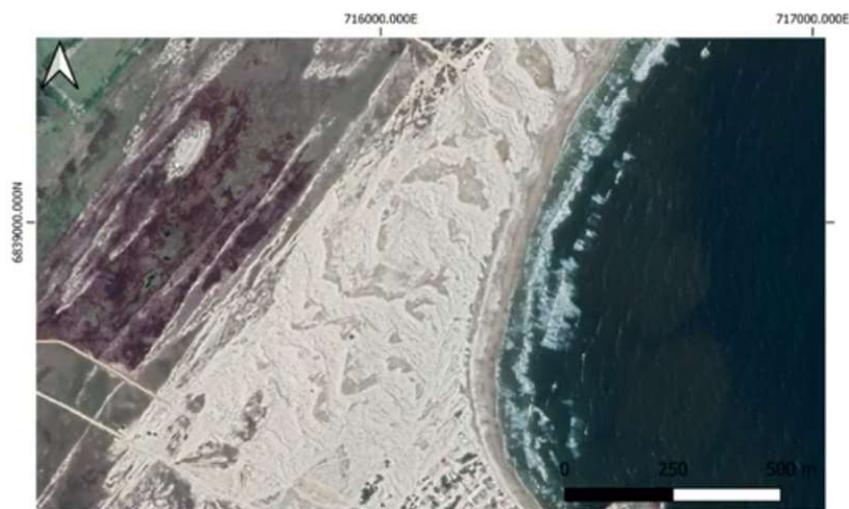


Figura 32. Sobreposição de períodos para comparação morfológica e análise da propagação da linha de frente do campo e variação da direção predominante do vento.

Em relação a 2019 e 2020, não são perceptíveis muitas mudanças morfológicas no campo de dunas. As formas das dunas não foram delimitadas nas imagens a seguir pois a intenção é evidenciar as características texturais e o contraste entre as imagens. Observa-se no verão de 2019, dunas de cristas barcanóides e um interduna bem definido. No verão de 2020, permanecem as dunas de cristas barcanóides. A menor diferença de contraste entre duna e interduna sugere um período seco e aumento de aporte sedimentar, porém os dados meteorológicos apontam um índice de precipitação de 105,4mm para os últimos trinta dias em relação a data do registro, sendo assim, esta diferença de contraste deve estar associada a resolução do satélite na época do registro. Para o mês de maio de 2020, estação do outono, uma pequena mudança textural é observada na imagem de satélite, provavelmente devido a um período de maior precipitação relacionada a este mês, da mesma forma como foi descrito anteriormente para a Figura 27, tornando os sedimentos mais coesos e deixando mais evidentes as formas das cristas indicando até mesmo uma possível transição de dunas barcanas e cristas barcanóides para dunas reversas, considerando que trata-se de uma estação onde existe influência de ventos opostos de direção SW.



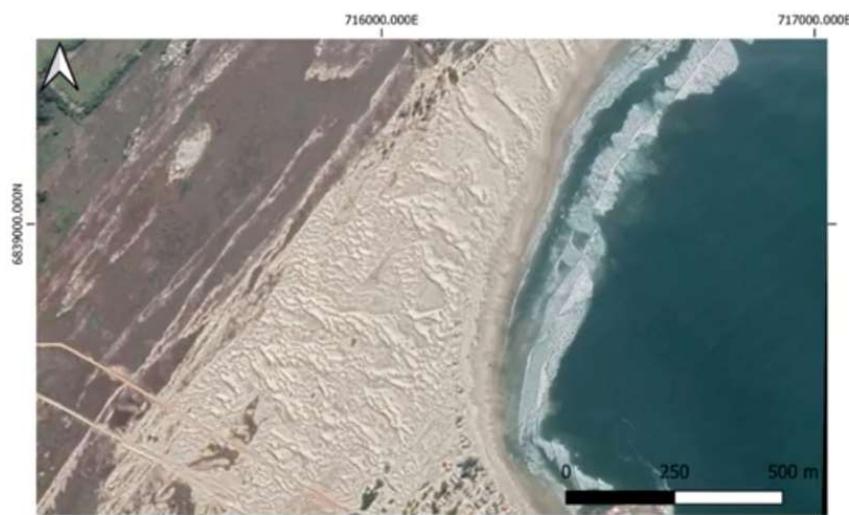
VERÃO
22/01/2019

Figura 33 – Dunas barcanóides com alto contraste em relação ao interduna.



VERÃO
14/01/2020

Figura 34 - Dunas barcanóides com baixo contraste em relação ao interduna.



OUTONO
24/05/2020

Figura 35. Textura demonstrando cristas bem definidas. Possível transição de dunas barcanas e cristas barcanóides para dunas reversas.

Tendo em vista as interpretações das modificações morfológicas apresentadas pelo campo, e a evidente propagação dos sedimentos arenosos para SW, foram sobrepostas as imagens de satélite do início e do final do período observado, a delimitação do perímetro do campo de dunas a SW foi realizada através do contraste entre os sedimentos arenosos e a vegetação da planície de deflação por onde ocorrem as incursões arenosas, é possível observar a diferença de posicionamento entre as duas linhas traçadas, as quais, foram interpretadas como o perímetro através do qual ocorre a propagação do campo de dunas (Figura 36). Este perímetro, é representado nas imagens de satélite por sedimentos arenosos que compõe a linha de frente da propagação do campo, onde em análise qualitativa e quantitativa, foi calculado o valor da distância de deslocamento entre as duas linhas, obtendo o valor de aproximadamente 300 metros, com uma taxa de propagação de 27 metros por ano (Figura 37), em um período de onze anos (2009 a 2020).



Figura 36. Sobreposição do perímetro de avanço do campo em 2009 para comparação com o ano de 2020.

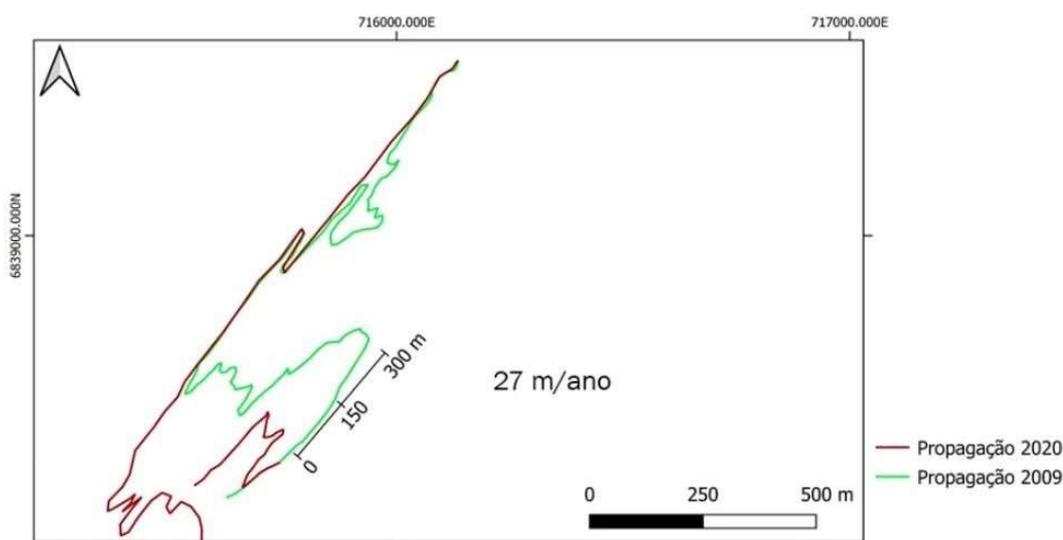


Figura 37. Análise qualitativa para estimativa da taxa de propagação da linha de frente do campo de dunas.

4.5 ORTOFOTOMOSAICO

A etapa descrita no item 3.5 foi executada parcialmente. O ortofotomosaico gerado cobre apenas uma parcela da área de coleta das imagens em campo. O modelo permite uma identificação das feições do campo de dunas em alto nível de detalhe, obtendo de maneira precisa o limite entre duna e interduna, faces de sotavento e barlavento, vegetação e áreas úmidas entre outras.

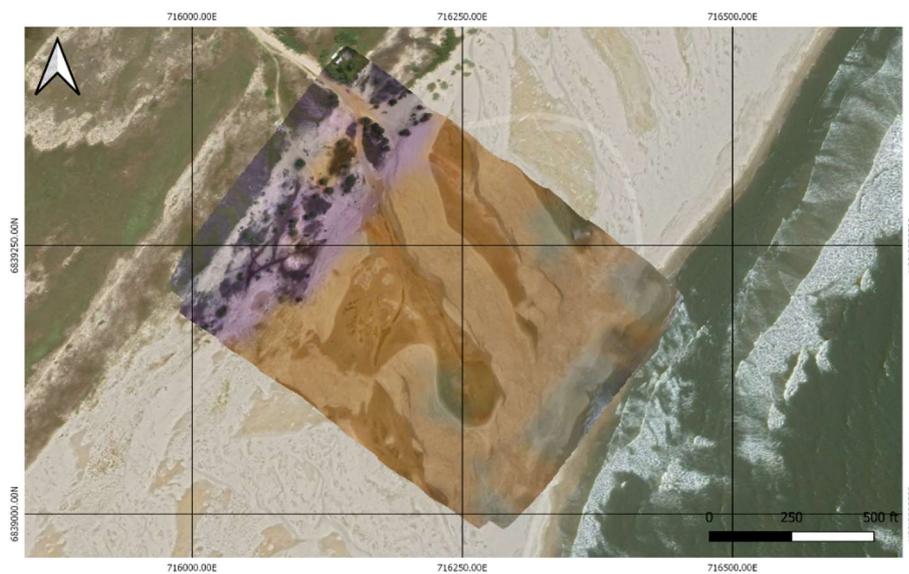


Figura 38. Ortofotomosaico construído a partir de imagens aéreas capturadas com VANT.

5. DISCUSSÕES

A taxa de propagação do campo de dunas foi estimada com base no perímetro através do qual o campo de dunas se movimenta, sendo representado pela incursão do manto de aspersão e o desenvolvimento de dunas barcanas, onde através da análise de imagens de satélite dos anos de 2009 a 2020, na escala de 1:10.000, foi obtida uma taxa de deslocamento médio de 27m/ano no sentido sudoeste.

Na praia da Cigana, localizada ao sul da área de estudo deste trabalho, Oliveira *et al.* (2019) identificou no campo de dunas ativo o predomínio de cristas barcanóides, com dunas originadas nas praias do norte do cabo de Santa Marta migrando para o sudoeste ao longo da planície costeira. A ausência de obstáculos na área do campo de dunas, como vegetação e intervenções humanas, favoreceu o transporte eólico. Para estimar a taxa de deslocamento do campo de dunas, cinco características da crista das dunas foram medidas por Oliveira *et al.* (2019), através da análise de imagens de alta resolução em 2003, 2009, 2013 e 2017. O cálculo mostra um deslocamento médio da taxa de cerca de 10,6 m/ano para o sudoeste.

Esta diferença entre os valores das taxas de mobilidade calculadas pode ser explicada pela distinção dos pontos de observação do campo de dunas, onde Oliveira *et al.* (2019), usou como referência o deslocamento das cristas de dunas barcanóides enquanto o presente trabalho utilizou como referência a “linha de frente” onde as partículas de areia transportadas depositam-se em forma de mantos de aspersão e desenvolvem a formação de dunas barcanas.

Outros trabalhos, como o realizado na costa do estado do Rio Grande do Sul por Tomazzeli (1993), também obteve valores da taxa de mobilidade do campo de dunas, onde identificou através da observação de fotografias aéreas, taxas com médias anuais semelhantes, variando de 10 até 38 m/ano considerando feições de depósitos mantiformes, dunas barcanas, cristas barcanóides e transversais, o que representa que o valor da taxa de mobilidade pode variar conforme a feição analisada como também variar consideravelmente para o mesmo tipo de feição eólica, considerando fatores locais, como a disponibilidade de areia, a altura das dunas, morfologia geral, orientação das cristas, quantidade de vegetação entre outros. Conforme já descrito por autores de trabalhos anteriores, o sentido de propagação do campo de dunas mantém-se para sudoeste, sendo dominado pelos ventos de direção NE sendo neste trabalho também predominante a direção NNE.

Conforme demonstra a Figura 32, e o gráfico de distribuição dos ventos predominantes (Figura 17), existe uma tendência à variação no sentido dos ventos predominantes nas estações de verão e inverno, variando entre NE e NNE, o que determina uma pequena mudança na sentido de transporte e deposição dos sedimentos arenosos de SW a WSW, podendo existir também uma tendência de transporte para WSW relacionado a uma incidência de ventos ENE, fenômeno que requer uma observação em maior nível de detalhe e escala temporal para ser definido o tempo necessário de predomínio de uma direção específica dos ventos responsáveis pela mudança de orientação das cristas das dunas, sendo que a análise morfodinâmica através das imagens de satélite considerou apenas o período do verão de 2017 até o inverno de 2018.

Para a definição da distribuição de frequências de velocidade do vento capaz de manter as partículas de areia em saltação, foi considerado as taxas superiores a 5m/s, conforme cálculo realizado por Tomazzeli (1993) para as dunas costeiras do litoral do estado do Rio Grande do Sul, a partir da equação desenvolvida por Frygerger (1976) e levando em conta outros fatores citados no método como o tamanho dos grãos de areia, variações topográficas da superfície, grau de umidade, presença de vegetação, etc... Devido ao estado modal morfodinâmico predominantemente intermediário das praias do setor Central da costa Catarinense, caracterizado por Horn Filho (2003), o resultado deste cálculo está sujeito a sofrer algumas alterações se considerado o mesmo método aplicado a área de interesse deste estudo. Uma maior precisão na obtenção destes dados que irão influenciar diretamente no resultado final da taxa de migração média das dunas eólicas requer um estudo de campo mais aprofundado, conforme realizado por Tomazzeli (1993), através da instalação de pontos de monitoramento a partir de marcos de controle, sendo a metodologia melhor detalhada em seu estudo.

Com base nos registros de precipitação, direção e velocidade dos ventos extraídos da estação automática do Farol de Santa Marta (A866), cadastrada no banco de dados do INMET, foram elaboradas rosas dos ventos com a média para os anos de 2009 a 2020. Apesar de a estação meteorológica apresentar algumas lacunas sem registros, a integralização dos dados foi feita com base nos registros para cada estação do ano dentro do período de análise, onde é possível obter uma distribuição de frequências das classes de velocidade dos ventos mais coerente, visto que o efeito das mudanças climáticas está relacionado a mudança na potência do vento (Tsoar &

Arens, 2003), o que gera um padrão de comportamento da direção e velocidade dos ventos para cada uma das estações do ano, como pode ser observado na Figura 16. Também foram identificadas lacunas sem registro para os índices de precipitação, onde, visando uma melhor representação dos dados, foram gerados gráficos de distribuição média mensal de precipitação para o período dos onze anos, apresentando valores bem distribuídos ao longo da média anual calculada (1.255,4 mm/ano), próximo ao observado por Orselli (1986), com média de 1.400mm/ano e 120 mm/mês, segundo a classificação de Köppen, onde o clima local é classificado como subtropical e constantemente úmido.

Levando em consideração as observações deste trabalho em relação aos índices de precipitação descritos no item 4.2 e autores como Orselli (1986) que definem o clima da região como constantemente úmido, é possível considerar a umidade como uma constante dentre os principais fatores atribuídos ao controle da taxa de transporte dos sedimentos. Nota-se que pelo fato de ser uma constante, não terá tanta influência assim como a incidência dos ventos, fator de maior variação no sistema ao longo dos anos, sendo o exemplo preponderante a ser considerado, pois apresenta maior variação em relação a direção e velocidade como observa-se no item 4.1. O que permite aferir dentro da hipótese referente ao fator de controle da desaceleração da propagação do campo de dunas que os ventos opostos a direção predominante têm maior influência sobre a desaceleração do campo se comparados a umidade presente no sistema.

Quanto ao surgimento da ocupação antrópica bem estabelecida e também o aumento da área vegetada para o ano de 2020 (Figura 20), é proposto que as barreiras físicas impostas a propagação dos ventos diminuem a sua velocidade, o que também diminui a sua capacidade de transportar sedimentos a determinadas distâncias antes alcançadas, proporcionando assim um ambiente estável e favorável a consolidação da vegetação. Tsoar & Arens (2003), explicam o desenvolvimento deste fenômeno por histerese, onde demonstram que mudanças na energia dos ventos, favorecem o surgimento da vegetação em campos de dunas.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo, procurou estabelecer uma relação entre os registros meteorológicos e as transformações ocorridas na morfologia e mobilidade do campo de dunas posicionado entre os promontórios rochosos da praia da Galheta e o balneário de Ypuã no litoral centro-sul catarinense, onde a relação foi estabelecida com base nas características morfológicas do campo de dunas, precipitação anual e velocidade e direção média dos ventos para as estações do ano, de janeiro de 2009 a dezembro de 2020.

A hipótese inicial previa que períodos de maior umidade no sistema desaceleravam a propagação do campo de dunas, porém, a distribuição dos índices de precipitação observados, evidenciam valores dos pontos de máximas e mínimas bem distribuídos em relação a média anual em uma escala temporal equivalente a uma década. Sendo assim, a umidade não é o único fator que rege o potencial de transporte das partículas de areia, o qual, tem uma relação intrínseca com o fluxo eólico, sendo este, de direção predominante variando de NE a NNE ao longo de todo o ano. O que promove a desaceleração da propagação, são os ventos de origem SW, provenientes das massas polares, opostas a direção predominante nos períodos de outono e inverno, gerando um menor percentual de atuação dos ventos de origem NE para estas estações.

A morfologia do campo de dunas não possui um padrão definido para cada estação do ano e pode variar conforme o grau de umidade presente no sistema em uma escala de tempo diária, desde dunas barcanas, cristas barcanóides a transversais. Através da observação em planta das imagens de satélite é possível observar uma mudança textural onde as cristas das dunas e a região interduna são melhores definidos em períodos de maior umidade, porém a alta permeabilidade devido a baixa coesão das partículas de areia faz com que os períodos secos sejam predominantes, voltando a prevalecer o transporte de grãos de areia pelo vento. Devido as lacunas existentes entre os períodos de registro das imagens de satélite, não foi possível estabelecer uma relação apurada entre as transições morfológicas, mas é possível dizer que essas modificações ocorrem constantemente, sendo estas, regidas pela umidade presente no sistema em relação aos períodos de tempo seco e a intensidade dos ventos.

Por fim, a presença da ocupação antrópica e até mesmo a vegetação sobre dunas estáveis são obstáculos que promovem a diferença de potencial dos ventos predominantes sobre a área de estudo, impedindo que atinjam a velocidade favorável ao transporte das partículas de areia, resultando na diminuição da área ocupada pelo campo de dunas livres nos últimos 63 anos.

REFERÊNCIAS

BONETTI, T. M. Discutindo a gestão urbana de áreas costeiras: o caso do Farol de Santa Marta/ Laguna-SC, Florianópolis: PGAU-CIDADE/UFSC, 2011; Tese de Mestrado, 144p.

COLLISCHONN, L., Gênese e ocorrência da camada aquífera “Sal Grosso” no litoral norte do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018, Monografia (Trabalho de conclusão de curso), 74p.

DIEHL, F. L.; HORN FILHO, N. O. 1996. Compartimentação geológico-geomorfológica da zona litorânea e planície costeira do estado de Santa Catarina. **Gravel**, 9:39-50

FRYBERGER, S. G. 1979. Dune forms and Wind regime. In: Mckee E. D. (Ed.) **A study of global sand seas**. Washington, D. C., U.S. Geological Survey. p. 137-169. (Geological Survey Professional Paper, n 1052).

GARDNER, D. E. 1955. Beach-sand heavy-mineral deposits of Eastern Australia. **Bureau of Mineral Resources, Geology and geophysics Bulletin**, 28: 1-103.

GIANNINI, P. C. F. Sistemas deposicionais no quaternário costeiro entre Jaguaruna e Imbituba, SC. São Paulo; v. 1, 1993; Programa de Pós- Graduação em Geologia Sedimentar; Tese de Doutorado, 278p.

GUADAGNIN, F., KROTH, M., KUMAIRA, S., MARTINS, D., DUARTE, R., Utilização de modelos virtuais de afloramento para análise estrutural, aplicada a recursos não convencionais. Anais do 10º SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – SIEPE. Novembro de 2018.

HESP, P. A. & THOM, B. G. 1990. Geomorphology and evolution os active transgressive dunefields. In: Nordstrom, K. F.; Psuty, N. P. & Carter, B. (eds) Coastal Dunes: Form and Process. London, John Wiley. p. 253-288.

HORN FILHO, N. O., LEAL, P. C., OLIVEIRA, J. S. Geologia das 117 praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, Brasil [suporte eletrônico] / Norberto Olmiro Horn Filho, Paulo César Leal, João Sérgio de Oliveira – Florianópolis: Edições do Bosque, 2017. 220 p. ISBN: 978-85-60501-32-8

HORN FILHO, N. O., Setorização da Província Costeira de Santa Catarina em base aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geográficos. Geosul, Florianópolis, v.18, n.35, p. 71-98, jan./jun. 2003

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 23/02/2021.

KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Económica. México. 1948. 479p

LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE. Wind Rose Plots For Meteorological Data – **WRPLOT View** – Version 8.0.2. 2018. Disponível em: <<https://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>>. Acesso em: 25/02/2021.

MCKEE, E. D. 1979. Introduction to a Study of Global Sand Seas. In: Mckee E.D. (Ed.) **A study of global sand seas**. Washington, D. C., U.S. Geological Survey. p. 1-19. (Geological Survey Professional Paper, n 1052).

MONTEIRO, C. A. F. 1958. *Atlas Geográfico de Santa Catarina*. Florianópolis, IBGE – Dpto Estadual de Geografia e Cartografia (Série 2, publ. 2).

OLIVEIRA, J. F., BARBOZA, E. G., MARTINS, E. M., SCARELLI F. M. Geomorphological and stratigraphic analysis applied to coastal management, **Journal of South American Earth Sciences**, 2019; 10p.

ORSELLI, J. Climatologia. In: GAPLAN-SC. **Atlas de Santa Catarina**, 1986. p. 38-39.

ROSA, M. L. C. C., BARBOZA, E. G., ABREU, V. S., TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S.R. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall; **Brazilian Journal of Geology**, 47(2): 183-207, June 2017.

SHORT, A. D. Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. 1. ed. Chichester: Wiley, 1999.

SOUZA, C R. de G. et al. Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: Souza, C. R. de G. et al. (eds.). Quaternário do Brasil, Holos Editora, Ribeirão Preto, 2005. p.130-152.

SOUZA, G. A. B., Retrogradação do sistema costeiro da Praia Grande, SC: Subsídios para gestão costeira integrada, Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015, Monografia (Trabalho de conclusão de curso), 47p.

STRAHLER, A. N. 1977. Geografia física. Barcelona, Omega. 767p.

TAVANI, S. et al. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An exemple from the Khaviz Anticline (Iran). **Computers & Geosciences**, v. 63, p. 44-53, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.013>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

TEIXEIRA, Wilson; FAIRCHILD, Thomas R.; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; TAIOLI, Fabio. Decifrando a Terra. [S.l: s.n.], 2009.

TOMAZELLI, L. J. DILLENBURG S. R., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C. C. Geomorfologia e potencial de preservação dos campos de dunas transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil; Revista Pesquisas em Geociências, 35 (2): 47-55, 2008; IGEO/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

TOMAZELLI, L.J., & VILLWOCK, J.A., 2005. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, Porto Alegre, v. 3, p. 109-115.

TOMAZELLI, L. J. 1990. Contribuição ao Estudo dos Sistemas Depositionais Holocênicos do Nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul com Ênfase no Sistema Eólico. Porto Alegre, UFRGS, Teses de Doutorado (inéd.). 270p.

TSOAR, Haim; ARENS, Sebastiaan M.. Mobilization And Stabilization Of Sand Dunes In Humid And Arid Climates. **Mercator**, Fortaleza, V. 2, N. 3, Nov. 2008. ISSN 1984-2201.

VILLWOCK, J.A. 1984. Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **A synthesis: Pesquisas**, v. 16, p. 5-49.

VILLWOCK, J. A. ; TOMAZELLI, J.L; LOSS, E.L; DEHNHARDT, EA; HORN FILHO, N.O.; BACHI, FA; DEHNHAROT, B.A. (1986) Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: RABASSA, J. (ed.) Quaternary o. South America and Antarctic Peninsula. Rotterdam, A.A.Balkema Publishers, v.4, p.79-97.

ZAROUBIN, J., Análise De Estruturas Sedimentares e Dunas Barcanas em Simulações Computacionais. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências - UFRJ, 2018. Monografia (Trabalho de conclusão de curso), 115p.