

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia



**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS DUNAS BARCANAS
DA REGIÃO DOS LENÇÓIS MARANHENSES - MA**

PAULA PINEL GODOY

Rio de Janeiro, RJ

2016

PAULA PINEL GODOY

**ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS DUNAS BARCANAS DA REGIÃO DOS LENÇÓIS
MARANHENSES - MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Geologia do Instituto de Geociências,
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do grau de Geóloga.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Rio de Janeiro, RJ

2016

ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS DUNAS BARCANAS DA REGIÃO DOS
LENÇÓIS MARANHENSES - MA

Paula Pinel Godoy

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia do Instituto de Geociências, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Geóloga.

Aprovada por:

Presidente: Prof. Dr^a. Andrea Ferreira Borges
(Orientadora)

Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2016

“Scientists have become the bearers of the torch of discovery in our quest for knowledge”

“Cientistas tornaram-se os portadores da tocha da descoberta em nossa busca por conhecimento”

(Stephen Hawking)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial aos meus tios Julia Pinel de Lemos, Maria Isabel Sathler Pinel e Luiz Eduardo Iatalese por terem me proporcionado a oportunidade de estudar em uma ótima universidade e conquistar uma carreira, pelo amor e companheirismo de tantos anos.

Agradeço com muito carinho à minha mãe, Cristina Sathler Pinel, por toda compreensão, incentivo, amor e otimismo durante todos esses anos.

Ao amigo Juan Valani, por tamanha dedicação e ajuda na realização desta pesquisa. Pela enorme criatividade e disposição sempre presentes, muito obrigada.

Ao colega Francisco de Assis Tavares Lordello, e aos Professores Dr. Edilson Marton do Departamento de Meteorologia da UFRJ e Dr. Armando Prestes de Menezes Filho, do Departamento de Engenharia Civil da UERJ, por terem auxiliado e se dedicado ao presente trabalho de maneira muito generosa.

Agradeço à Professora Andrea Ferreira Borges pela orientação durante a elaboração deste trabalho, sugestões, ideias e ajuda ao longo do período de pesquisa.

Ao querido companheiro Filipe Pungirum Onofre, pela ajuda, incentivo e paciência ao longo da realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida para o desenvolvimento desse projeto.

Ao Laboratório de Geologia Sedimentar da UFRJ, LAGESED, por disponibilizar recursos materiais para realização deste trabalho.

Ao amigo e colega de pesquisa, Pedro Henrique Calçada de Medeiros, por auxiliar no presente estudo e pela excepcional companhia durante a elaboração desta monografia e ao longo do período de graduação.

E, finalmente, aos amigos conquistados ao longo da graduação, em especial aos amigos Beatriz Sabino e Diego Vieira, que tornaram estes anos os mais especiais através do companheirismo, das risadas e das histórias vividas.

RESUMO

ESTUDO EM TÚNEL DE VENTO DAS DUNAS BARCANAS DA REGIÃO DOS LENÇÓIS MARANHENSES - MA

Paula Pinel Godoy

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Resumo do trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Geóloga.

Dunas costeiras são elevações de areia formadas pela interação entre o mar, o vento, a areia e a vegetação. Elas fazem parte do contexto de erodibilidade da faixa litorânea, e estão diretamente relacionadas a fatores ecológicos e socioeconômicos. Dunas possuem um grande papel ambiental ligado à biodiversidade e à paisagem, uma influência grande na geração de atividades turísticas, mas também podem causar desastres ambientais devido a sua migração. A migração de dunas é capaz de soterrar vilas, vias de acesso e corpos d'água. Portanto, é de suma importância o estudo desses corpos sedimentares ativos, para poder compreender e contornar questões relacionadas aos campos de dunas. Para esse trabalho, foi investigada uma amostra de material arenoso provenientes de campos dunas da região dos Pequenos Lençóis, no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM)/MA. Visando contribuir com os estudos brasileiros sobre migração dunas, este trabalho consistiu na tentativa de geração de um modelo em escala reduzida de duna, a partir de um cone de areia. O cone de areia é uma curva realística próxima à curva Gaussiana descrita no trabalho de Herrmann e Sauermann (2000), como forma inicial na simulação computacional feita pelos mesmos e usada como referência neste estudo. Os ensaios com areia de duna foram realizados dentro de um túnel de vento subsônico de pequenas dimensões. Realizou-se preliminarmente um estudo sedimentar das areias originais do PNLM, através de ensaios de granulometria, sedimentação, condutividade elétrica e salinidade, e descrição sedimentar com microscópio. Foram feitas análises completas de dados meteorológicos de direção e intensidade do vento nos Lençóis Maranhenses, análises detalhadas do campo de ventos dentro da área de testes do túnel de vento e estudos matemáticos de adimensionalização para o modelo em escala. A Plataforma Móvel foi construída para auxiliar no melhor aproveitamento das condições de ensaio; diversos testes com areia foram realizados dentro do túnel de vento, e importantes adaptações foram feitas para que fosse gerado o melhor modelo em escala de duna barcana possível nas condições atuais. Concluiu-se que não foi possível gerar, até o final deste trabalho, um modelo próximo à duna barcana a partir da observação de divergências entre as áreas de erosão e sedimentação no corpo de ensaio e nas dunas reais.

Palavras-chave: duna, túnel de vento, areia.

ABSTRACT

STUDY OF SALTY SPRAY INFLUENCE ON THE MIGRATION OF PERÓ AND LENÇÓIS MARANHENSES COASTAL DUNES

Paula Pinel Godoy

Academic advisor: Andrea Ferreira Borges

Final course assignment abstract's submitted to the Geology Department of the Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Geosciences Institute, as part of the requirements to obtain the geologist degree

Coastal dunes are elevations of sand, made by the interaction of sea, wind, sand and vegetation. They are part of the erosional context of seaside boundaries, and are directly linked to ecological and socioeconomic factors. Dunes play a great environmental role associated with biodiversity and landscape, a great influence on touristic activities, but can also generate environmental disasters caused by their migration. Dunes migration are capable of overwhelming villages, access ways and water bodies. Therefore, the study of these live sedimentary bodies is very important to comprehend and avoid questions related to dune fields. For this work, a sand sample from the dune field of Pequenos Lençóis, Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM)/MA, was investigated. Seeking contribute with the brazilian studies of dunes' migration, this work consisted in trying to create a model in reduced scale of a dune, starting from a sand cone. The sand cone is a realistic curve close to a Gaussian curve as described by Herrmann and Sauermann (2000), as a initial form in their computer simulation used as a reference for this study. Tests with sand dunes were performed inside a subsonic wind tunnel of small dimensions. Preliminarily, a sedimentary study of sands original from PNLM was made through granulometry trials, sedimentation trials, electrical conductivity and salinity trials, and sedimentary description using a microscope. Complete analysis of meteorological data of wind direction and intensity of Lençóis Maranhenses were made, as well as detailed analysis of wind camp inside the test area of the wind tunnel and dimensionless mathematical studies to the model in scale. The Mobile Platform was built to help use the best experiment conditions; many tests with sand were performed inside the wind tunnel, and important adaptations were made to generate the best model in scale of a barcan dune possible nowadays. These experiments allowed concluding that it was not possible to create, until the end of this work, a model close to a barcan dune, based on erosion and deposition differences between areas of real dunes and the model.

Key words: sand dunes, wind tunnel, sand.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Localização geográfica do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e da Estação Meteorológica de Farol Preguiças, município de Barreirinhas, MA. Disponível em Google Earth. Acessado às 12:30 de 29 de janeiro de 2016..... 18
- Figura 2.** Visão aérea da desembocadura do Rio Preguiças com a presença de ilhas de barreira, praias de arenosas, traços de migração de duna, com a planície de deflação do vento e campo de dunas transversas incluindo piscinas de interduna localizada no Canto de Atins, dentro do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, Maranhão/Brasil. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotografia Meireles Junior. 19
- Figura 3.** Vista do Farol Preguiças, situado na vila de Mandacaru, o qual permite a vista do rio, praias, ilhas, mangues e campo de dunas. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotografia Meireles Junior. 20
- Figura 4.** Vista parcial do campo de dunas móveis no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotografia Meireles Júnior. 21
- Figura 5.** Duna barcana na superfície praias próximo ao Rio Novo. Apresenta 15 m de largura, 3 m de comprimento e 0,6 m de altura. Observam-se estruturas de fluxo de grãos próximos a escala. Figura retirada de Gonçalves *et al.* 2003. 23
- Figura 6.** Fino lençol de areia e campo de pequenas dunas barcanas. Figura retirada de Herrmann *et al.*, 2006. 24
- Figura 7.** Mapa da compartimentação tectônica da região das bacias de Barreirinhas e Parnaíba (Gastão e Maia 2010, modificado de CPRM, 2000). 26
- Figura 8.** Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano) modificado de Soares Jr. *et al.* 2008. FA - Bacia da Foz do Amazonas; M - Bacia de Marajó; B - Bacia de Barreirinhas; BV - Bacia de Bragança - Viseu; SL - Bacia de São Luís; IN - Bacia de Ilha Nova; PM - Bacia do Pará-Maranhão; ag - Arco de Gurupá; afus - Arco Ferrer-Urbano Santos; at - Arco do Tocantins. 28
- Figura 9.** Mapa paleogeográfico do Neocretáceo (Turoniano) modificado de Soares Jr. *et al.* 2008. FA - Bacia da Foz do Amazonas; M - Bacia de Marajó; B - Bacia de Barreirinhas; BV - Bacia de Bragança - Viseu; SL - Bacia de São Luís; IN - Bacia de Ilha Nova; PM - Bacia do Pará-Maranhão; ag - Arco de Gurupá; afus - Arco Ferrer-Urbano Santos; at - Arco do Tocantins.... 30
- Figura 10.** Gráfico de número de poços vs. ano. Figura retirada Ferreira (2013). 33

Figura 11. Curva de forma Gaussiana usada para a simulação do modelo de Herrmann e Sauermann (2000), Herrmann e Sauermann (2000).....	39
Figura 12. Superfície simulada após 50 000 interações utilizando o modelo de Herrmann e Sauermann (2000), Herrmann e Sauermann (2000).	39
Figura 13. Processos de transporte de grãos pelo vento. São esses: suspensão, saltação e arraste. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.	41
Figura 14. Gráficos de associação entre a velocidade do vento necessária para gerar movimento dos grãos, a forma de transporte dos grãos e as formas deposicionais resultantes desse transporte com relação à granulometria das partículas. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.	42
Figura 15. Graus de seleção de grãos e sua capacidade de afetar a susceptibilidade ao arraste e de mudar a rugosidade de uma superfície. Disponível em: https://wwwf.imperial.ac.uk/earthscience.andengineering/rocklibrary/viewglossrecord.php?gID=00000000303 . Acesso em 24/11/15.	43
Figura 16. O vento carrega os sedimentos acima e sobre as dunas através dos movimentos de suspensão, arraste, saltação e o efeito balístico associado. Grãos saltam sobre a face de barlavento da duna e escorregam sobre a face de sotavento. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.....	44
Figura 17. Trajetória de um único grão saltante. Figura retirada de Summerfield, 1991.	45
Figura 18. (esq.) Gráfico mostrando a distribuição desuniforme da velocidade do vento em um espaço de tempo. (dir.) Gráfico mostrando o fluxo de areia relativo aos ventos descritos pelo gráfico à esquerda. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.	45
Figura 19. O padrão de fluxo de ar em uma duna barcana isolada reconstruído a partir de dados coletados em campo perto de In Salah na Argélia por P. Knott. Figura retirada de Summerfield, 1991.	46
Figura 20. Ponto amostrado no PNLM. Coordenadas 757072 E e 9706914 S. Fonte: Google Earth. Figura retirada de Medeiros, 2015.	47
Figura 21. Condutivímetro utilizado nos ensaios. Foto da autora.	48
Figura 22. Valores de salinidade em g/kg para a amostra de areia após o processo de lavagem com água destilada.	49
Figura 23. Agitador (esq.) e provetas com o material imediatamente antes de ser agitado manualmente para sedimentação (dir.) (Medeiros, 2015).	50
Figura 24. Agitador de peneiras. Foto da autora.	51

Figura 25.	Curva Granulométrica gerada para amostra de areia dos Lençóis Maranhenses (Medeiros, 2015).	51
Figura 26.	Distribuição granulométrica para amostra de areia dos Lençóis Maranhenses (Medeiros, 2015).	52
Figura 27.	Microscópio Strememicroscope Stemi 2000-C (ZEISS)/CL 1500 ECO. Foto da autora.....	53
Figura 28.	Litoclástos e fragmentos de conchas – 2.0 x aumento (esq.) e espinho de equinóide – 3.8 x aumento (dir.). Imagens vistas a partir do nicol do microscópio <i>Strememicroscope Stemi 2000-C (ZEISS)/CL 1500 ECO</i> . Fotos da autora.....	54
Figura 29.	Rotina (script) do MACRO VBA utilizado no presente trabalho, parte I.	57
Figura 30.	Rotina (script) do MACRO VBA utilizado no presente trabalho, parte II.....	58
Figura 31.	Tabela xls aplicada em <i>Software WRPLOT View Freeware 7.0.0</i>	60
Figura 32.	Dados em formato sam carregados em <i>Software WRPLOT View Freeware 7.0.0</i>	61
Figura 33.	Gráfico correspondente a Rosa 9 Verões. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).	62
Figura 34.	Rosa dos ventos Rosa 9 Verões. Período de tempo contabilizado de 01/12/2008 a 28/02/2015. Estação do ano: verão; total de horas contabilizadas: 15110. <i>WRPLOT View - Lakes Environmental Software</i>	63
Figura 35.	Gráfico correspondente a Rosa 10 Outonos. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).	64
Figura 36.	Rosa dos ventos Rosa 10 Outono. Período de tempo contabilizado de 01/03/2008 a 31/06/2015. Estação do ano: outono; total de horas contabilizadas: 13876. <i>WRPLOT View - Lakes Environmental Software</i>	65
Figura 37.	Gráfico correspondente a Rosa 11 Invernos. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).	66
Figura 38.	Rosa dos ventos Rosa 11 Invernos. Período de tempo contabilizado de 01/08/2008 a 30/08/2015. Estação do ano: inverno; total de horas contabilizadas: 12163. <i>WRPLOT View - Lakes Environmental Software</i>	67
Figura 39.	Gráfico correspondente a Rosa 12 Primaveras. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).	68
Figura 40.	Rosa dos ventos Rosa 12 Primaveras. Período de tempo contabilizado de 28/11/2008 a 30/11/2015. Estação do ano: primavera; total de horas contabilizadas: 13238. <i>WRPLOT View - Lakes Environmental Software</i>	69

Figura 41.	Quadro geral comparativo das rosas dos ventos das quatro estações do ano. É possível notar através da imagem e do texto as mudanças nas direções e velocidades dos ventos de estação para estação do ano.....	70
Figura 42.	Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Verão plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).	71
Figura 43.	Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Outono plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).	71
Figura 44.	Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Inverno plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).	72
Figura 45.	Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Primavera plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).	72
Figura 46.	Desenho esquemático do túnel de vento utilizado durante os ensaios e suas principais medidas.	75
Figura 47.	Anemômetro usado para medir as velocidades e temperaturas dentro do túnel de vento durante os ensaios. Foto da autora.	75
Figura 48.	Processo de construção das molduras de madeira e amarração da grade de ferro. Fotos da autora.	77
Figura 49.	Teste de visualização do escoamento de ar dentro do túnel de vento usando grande com fitilhos. Foto da autora.	78
Figura 50.	Teste de visualização do escoamento de ar; fitilhos variando de sentido próximo aos cantos da câmara do túnel. Fotos da autora.	79
Figura 51.	Desenho esquemático da seção interna do túnel de vento, distinguindo a área com ventos instáveis e a área com ventos de maior estabilidade.	80
Figura 52.	Comprimento da duna barcana. Figura modificada de Gonçalves <i>et al.</i> , 2003, fig. 2, p. 101.	85
Figura 53.	Planejamento da Plataforma Móvel. Ilustração da autora.	86
Figura 54.	Plataforma Móvel. Foto da autora.	86
Figura 55.	Material usado para construção da Plataforma Móvel. Foto da autora.	87
Figura 56.	Processo de construção da Plataforma Móvel. Fotos da autora.	88
Figura 57.	Esq. prato de vidro com os furos central e lateral para encaixe do parafuso e da barra de leitura respectivamente, e dir. prato coberto com lixa e marcado com lápis de cor. Fotos da autora.	88
Figura 58.	Suporte para o prato: topo, base, pilares, parafusos, porcas, arruelas e barra roscada. Foto da autora.	89

Figura 59. Topo do suporte: peças de madeira separadas por espuma de estofado. Foto da autora.....	90
Figura 60. Base do suporte e pilares com porcas. Foto da autora.....	90
Figura 61. Prato da Plataforma Móvel, cone inicial de areia e bússola para ajustar a inclinação da superfície do prato. Foto da autora.....	92
Figura 62. Suporte de ferro com funil acoplado usado para despejar a areia sobre a Plataforma Móvel. Foto da autora.....	93
Figura 63. Desenho esquemático em planta do túnel de vento com as posições adotadas (1, 2, 3, 4 e 5) para a base Plataforma Móvel durante a realização dos testes e ensaios.....	94
Figura 64. Teste I e localização do cone inicial sobre o prato da plataforma. Foto da autora.....	94
Figura 65. Teste I, cone inicial e feições de coesão na areia. Foto da autora.....	95
Figura 66. Teste II e o cone inicial de areia. Foto da autora.....	96
Figura 67. Imagem comparativa do desenvolvimento do cone de areia em diferentes momentos do Teste II na posição 2. Fotos da autora.....	96
Figura 68. Conformação final do cone de areia Teste II.....	97
Figura 69. Teste III e posição central do cone inicial de areia. Foto da autora.....	98
Figura 70. Violeta Genciana 1% (esq.) e cone inicial Teste IV (dir.). Fotos da autora.....	99
Figura 71. Configuração final Teste IV. Camada externa colorida com Violeta Genciana se destacando na parte interna do monte de areia. Desenho esquemático mostrando as direções esperada e obtida para o vento. Foto da autora.....	100
Figura 72. perfil do campo de ventos que circunda o cone inicial de areia com valores de velocidade em metros por segundo referente a cada posição indicada.....	101
Figura 73. Desenho esquemático da seção interna do túnel, ilustrando a configuração do método de grade com fitilhos.....	102
Figura 74. Foto da seção interna do túnel e o método de grade com fitilhos. Foto da autora.....	103
Figura 75. fotos em planta do método utilizado Bill Montagne (2009) adaptado sobre o prato da plataforma, com e sem a presença do corpo de areia. Fotos da autora.....	104
Figura 76. Desenho esquemático da seção interna do túnel de vento e as posições onde foram medidas as velocidades do ar. Destaque em vermelho para as posições onde foram medidas velocidades acima de 5 m/s.....	105
Figura 77. Configuração inicial do ensaio oficial. Foto da autora.....	107

Figura 78. Quadro comparativo dos momentos de evolução do cone de areia do ensaio oficial. Fotos da autora.	108
Figura 79. Momentos inicial e final do ensaio oficial em destaque amarelo. Fotos da autora.....	109
Figura 80. Imagem vista de barlavento da forma de estudo. Destaque em vermelho para as zonas de erosão na porção superior das laterais.	110
Figura 81. Traçado marcado pela erosão e segregação de grãos feita pelo vento. Fotos da autora.....	111
Figura 82. Imagens de perfil da forma de areia. Foto original natural e com contraste, além das mesmas com destaque para as áreas de erosão (em roxo) e deposição (em laranja). Fotos da autora.....	112
Figura 83. Padrão de fluxo de ar em uma duna barcana isolada reconstruído a partir de dados coletados em campo perto de In Salah na Algéria por P. Knott. Desenho esquemático em cores da movimentação lateral dos grãos de areia. Figura modificada de Summerfield, 1991.....	113
Figura 84. Foto e desenho esquemático do fluxo de vento e grãos no modelo em túnel de vento. Setas vermelhas marcam o fluxo de ar e círculos amarelos exemplificam a movimentação dos grãos de areia. Figuras pontilhadas marcam processos não confirmados, porém prováveis, ao longo do experimento. Foto da autora.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de medidas encontradas no túnel de vento utilizado na presente análise...	83
Tabela 2. Valores de Re real encontradas para o PNLM.....	84
Tabela 3. Dados de velocidade do vento relativos a cada posição da seção interna do túnel de vento.	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos.....	17
1.2 Localização.....	18
1.2.1 <i>O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses</i>	20
1.2.2 <i>Clima</i>	21
1.2.3 <i>Hidrografia</i>	21
1.2.4 <i>Marés</i>	21
1.2.5 <i>Vegetação</i>	22
1.3 As dunas do PNLM	22
1.3.1 <i>As dunas barcanas do PNLM</i>	23
2 GEOLOGIA REGIONAL E TECTÔNICA	26
2.1 Evolução tectônica da região Norte e Nordeste do Brasil	27
2.2 Geologia regional do PNLM	31
2.2.1 <i>Ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Barreirinhas</i>	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1 Modelagem de sistemas naturais	35
3.2 O modelo matemático de Herrmann e Sauermann (2000)	36
3.3 Morfodinâmica dunar	41
4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA	47
5 DESCRIÇÃO SEDIMENTAR	50
6 ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS DE DIREÇÃO E INTENSIDADE DO VENTO	55
6.1 Aquisição dos dados	55
6.2 Processamento dos dados	56
6.2.1 <i>Programação do Software Microsoft Excel 2010</i>	56
6.2.2 <i>Produção da rosa dos ventos</i>	58
6.2.3 <i>Aplicação dos dados em software WRPLOT View 7.0.0</i>	59

6.3 Resultados - rosas dos ventos	61
6.3.1 <i>Interpretação dos Dados Meteorológicos</i>	72
7 DESCRIÇÃO DO TÚNEL DE VENTO.....	74
8 ESTUDO AERODINÂMICO PRELIMINAR.....	77
8.1 O escoamento de ar.....	78
9 TURBULÊNCIA E ADIMENSIONALIZAÇÃO DO MODELO.....	81
9.1 Cálculos para o modelo	82
9.2 Modelo vs realidade.....	84
10 DESIGN DA PLATAFORMA MÓVEL	86
11 TESTES COM AREIA.....	92
11.1 Teste I.....	92
11.2 Teste II.....	95
11.3 Teste III.....	97
11.4 Teste IV	98
11.5 Teste V.....	100
12 ESTUDO AERODINÂMICO COMPLEMENTAR.....	102
12.1 Mapeamento detalhado das velocidades do vento.....	105
13 ENSAIO OFICIAL.....	107
13.1 Resultados.....	108
13.2 Conclusão	112
13.3 Discussões e sugestões	114
14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho se encaixa no contexto de análise da vulnerabilidade da faixa litorânea à erosão das dunas costeiras. Tal processo está tanto diretamente relacionado à influência física de fenômenos naturais vinculados ao mar, como os ventos e marés, quanto à influência social e econômica da pressão urbanística sobre a costa. Portanto, é evidente a necessidade de melhor compreensão e caracterização dos processos que influem diretamente sobre as características dinâmicas e geomorfológicas das dunas costeiras devido ao seu grande papel econômico e socioambiental.

Dunas costeiras são pequenas elevações de areia formadas pela interação entre o mar, o vento, a areia e a vegetação. Parte dos grãos transportados pelas correntes marítimas litorâneas é depositada nas praias pelas marés altas. Ventos que carregam a areia fina dão origem às dunas. Dunas servem de barreira natural à invasão da água do mar e da areia em áreas interiores e balneários. Elas também protegem o lençol de água doce, evitando a entrada de água do mar, além de constituírem uma riqueza natural singular em beleza e biodiversidade.

Visando a análise e caracterização dos processos de formação, deslocamento e manutenção de dunas barcanas, foram consideradas no estudo as características físicas e composicionais dos sedimentos de exemplares do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses; além de condições eólicas e de umidade do ambiente em estudo. A proposta de trabalho baseia-se em simular a erosão eólica de um corpo de areia através de um modelo em escala, usando como referências modelos pretéritos encontrados na literatura.

1.1 Objetivos

Este estudo busca auxiliar na compreensão dos fatores relacionados às condições de velocidade e direção do vento, determinantes na formação de dunas barcanas, através de um modelo em escala reduzida analisado em túnel de vento. Os elementos aqui pesquisados incluem estudos meteorológicos, sedimentológicos, aerodinâmicos e matemáticos associados ao campo de dunas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (MA). Características típicas do transporte eólico, como áreas de erosão e deposição, são também analisadas. Os ensaios realizados no túnel forneceram informações sobre o campo de dunas gerado nos ensaios e no Parque Nacional, capazes de auxiliar no entendimento dos processos de formação das dunas. Foram questionados os fatores de influência neste processo, os parâmetros de semelhança do modelo e os possíveis erros associados ao mesmo.

1.2 Localização

O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses foi criado e reconhecido oficialmente no dia 02 de julho de 1981, por meio do Decreto Nº 86.060 do Governo do Presidente João Figueiredo (Hasui *et al.*, 2012).

Como afirmado por Vieira *et al.* (2015) e Radam (Brasil 1973; Maranhão 2003), a unidade geomorfológica Lençóis Maranhenses é uma extensa área costeira plana, caracterizada por relevo médio a moderado. Segundo Hasui *et al.* (*op. cit.*), os Lençóis Maranhenses representam um campo de dunas associado a sistema eólico costeiro úmido, caracterizado por nível freático raso e depósitos de interduna úmida, com presença de lagoas (fig. 1). Na região onde se insere o parque nacional, os ventos vêm predominantemente da direção nordeste (ventos alísios – Massa Equatorial Norte), sudeste (Massa Equatorial Atlântica) e leste (Massa Tropical Atlântica).

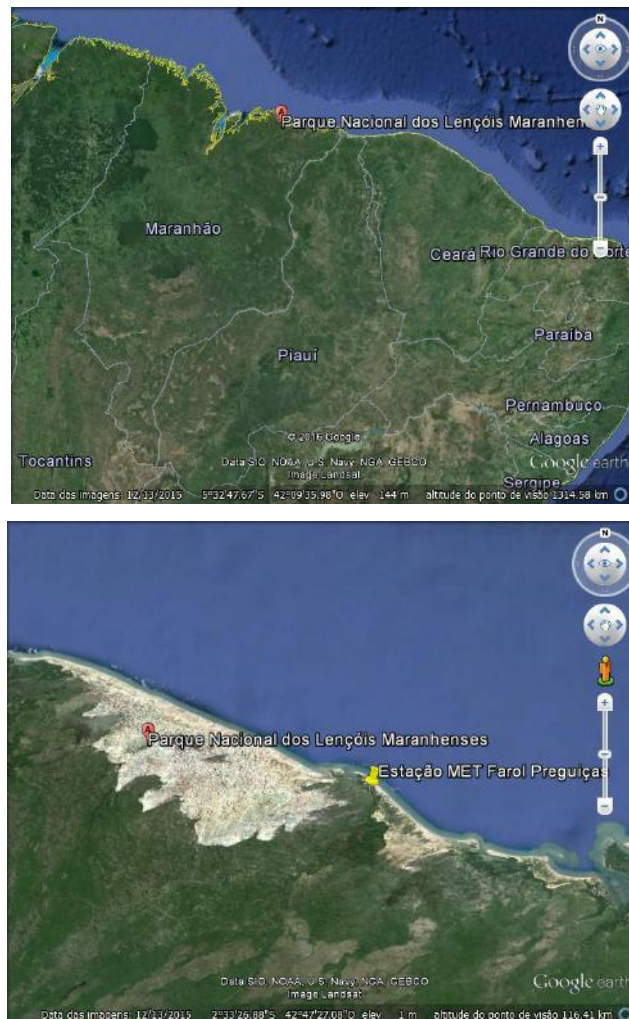


Figura 1. Localização geográfica do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e da Estação Meteorológica de Farol Preguiças, município de Barreirinhas, MA. Disponível em Google Earth. Acessado às 12:30 de 29 de janeiro de 2016.

A ocupação do território da unidade de conservação corresponde a zonas rurais, onde a apropriação humana é descontínua, concentrada no entorno de rios locais e estradas de acesso. Segundo Vieira *et al.* (*op. cit.*), são observadas em sua maioria pequenas propriedades de menos de 10 ha ou pequenas vilas rústicas. Serviços públicos são mais facilmente encontrados em sedes municipais de regiões de maior aglomeração populacional fora da área de conservação do parque (fig. 2 e 3).



Figura 2. Visão aérea da desembocadura do Rio Preguiças com a presença de ilhas de barreira, praias de arenosas, traços de migração de duna, com a planície de deflação do vento e campo de dunas transversas incluindo piscinas de interduna localizada no Canto de Atins, dentro do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, Maranhão/Brasil. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotógrafo Meireles Junior.



Figura 3. Vista do Farol Preguiças, situado na vila de Mandacaru, o qual permite a vista do rio, praias, ilhas, mangues e campo de dunas. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotógrafo Meireles Junior.

1.2.1 O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses

O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses caracteriza-se por um extenso campo de dunas, onde encontram-se dunas de diversos tipos. São reconhecidas na costa oriental do Maranhão, dunas classificadas de acordo com sua morfologia e origem (Gonçalves *et al.* 2003). Hasui *et al.* (2012) afirma que a classificação desses tipos de duna no Parque Nacional separa tais feições sedimentares em três categorias básicas de dunas de acordo com sua mobilidade, representadas pelas dunas livres ou móveis, dunas semifixas (associadas a vegetação) e dunas fixas. À categoria de dunas livres pertencem as dunas barcanas, que são o foco do presente estudo.

Além das dunas transversais, parabólicas e barcanas que se destacam na paisagem, são observadas planícies de deflação do vento, restingas, bancos de areia, piscinas, lagoas, lagos, barras de acreção, e planícies de inundação ou de marés, com ou sem a presença de vegetação de mangue, dentre outras feições sedimentares (Hasui *et al.*, (*op. cit.*)). Os numerosos interdunas, temporários e/ou permanentes, são preenchidos por piscinas de água doce e podem ser encontrados em depressões entre as dunas ativas. A água da chuva ou do lençol freático são responsáveis por encher os interdunas, que possuem diferentes formas, tamanhos e profundidades (Vieira *et al.* 2015 apud Santos *et al.* 2009) (fig. 4).



Figura 4. Vista parcial do campo de dunas móveis no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Figura retirada de Vieira *et al.*, 2015. Fotografia Meireles Júnior.

1.2.2 Clima

O clima da região dos Lençóis Maranhenses é caracterizado como megatermal tropical, quente e úmido a subúmido. A área é sujeita à massa de ar marinha equatorial e à convergência de ventos alísios do nordeste e sudeste, resultando em um regime máximo de chuvas durante o período de janeiro a julho e um regime mínimo de chuvas de agosto a dezembro. Aproximadamente 90% das chuvas anuais ocorrem durante o período de fevereiro a maio. Durante a temporada de seca, somente 10% da chuva anual ocorre. Essa situação leva à diferenciação na paisagem deste sistema sedimentar eólico (Vieira *et al.*, 2015).

1.2.3 Hidrografia

Conforme Hasui *et al.* (2012), a região dos Lençóis Maranhenses é atravessada pelos rios Preguiças, Negro, Munim, Piri, Buriti, Palmira, Marciano, Alegre Grande e outros menores, sendo que todos pertencem à Bacia Hidrográfica Atlântico Norte.

É importante destacar que o Rio Negro é localizado na área central da unidade de conservação do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, e é o único que atravessa o parque de dunas de sul a norte (Vieira, (*op. cit.*)).

1.2.4 Marés

Vieira *et al.* (*op. cit.*) afirma que de acordo com dados da Divisão de Hidrografia e Navegação, DHN, e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, CPTEC, a região

entre a desembocadura do Rio Parnaíba até a Baía Tubarões (Primeira Cruz, MA) possui um regime de mesomaré (2 - 4 metros), do tipo semi-diurno, que aumenta em direção a cidade de São Luiz. Esse regime de mesomaré é responsável pela largura significativamente grande do cordão de areia das praias locais, onde as areias finas de quartzo, uma vez secas, são transportadas em direção ao continente durante a maré baixa.

1.2.5 Vegetação

De acordo com o sistema fitogeográfico estabelecido pelo IBGE (1992), a vegetação do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses é caracterizada como sistema primário (natural), enquadrado pela classificação de áreas de formação pioneiras, que em escala regional compreende vegetação com influência marinha (restinga), vegetação com influência fluvial-marinha (mangue), vegetação com influência fluvial (comunidades aluviais de flora) e vegetação de pradarias e cerrado (Vieira *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que, além da hidrografia, a vegetação do PNLN exerce grande influência na taxa de migração de dunas em certos setores do parque, da mesma forma que é importante para a manutenção da biodiversidade local.

1.3 As dunas do PNLN

Conforme Hasui *et al.* (2012), várias gerações de dunas de idades diferentes são responsáveis por compor os campos de dunas costeiras. Diferentes gerações de dunas são resultado de variações climáticas com ocorrência de intervalos com clima árido, responsáveis pelo incremento da atividade eólica.

Especificamente para os Lençóis Maranhenses, datações por termoluminescência de dunas eólicas inativas relativas aos últimos milhares de anos revelaram diversas fases de formação e evolução das dunas (Santos e Silva, 2009). “Idades correspondentes a 3.930, 4.400 e 3.100 anos correlacionam-se com a posição e distância em relação à linha da costa, nos moldes do que hoje ocorre com as dunas ativas, que avançam sobre as dunas pretéritas existentes no seu percurso. Há indícios que no período compreendido entre 3.000 e 4.400 anos AP tenha ocorrido uma significativa atividade eólica na região dos Lençóis Maranhenses, interrompida pelo advento de clima mais úmido, que promoveu a fixação das dunas. Esses dados enquadram-se nas variações climáticas de nove fases de alternâncias climáticas, desde há 21.000 anos AP, determinadas por datações de diatomáceas na Lagoa do Caçó, a 50 km de Barreirinhas” (Nascimento *et al.* 2003 apud Santos e Silva 2009).

Ainda segundo Santo e Silva (*op. cit.*), existem dunas holocênicas fixas e móveis no PNLM, sendo que as dunas Pleistocênicas, com idades entre 12.000 e 23.800 anos AP, ocorrem no interior, fora dos limites do parque. Durante o Pleistoceno já predominavam ventos de direção nordeste, o que justificaria a migração dessas dunas para longe da linha de costa.

1.3.1 As dunas barcanas do PNLM

De acordo com Gonçalves (2003) e Hasui *et al.* (2012), as dunas barcanas formam-se na superfície praiial (pós-praia) e deslocam-se para o interior do campo de dunas pela ação dos ventos alísios NE, aumentando de tamanho à medida que acumulam areia. Os braços ou chifres das dunas barcanas são aproximadamente simétricos (barcanas regulares) (fig. 5), sendo que tendem a tornarem-se assimétricos à medida que ocorre sua migração (barcanas irregulares). Ao afastarem-se da linha da praia, as dunas barcanas tendem a coalescer, formando cadeias de barcanas de pequeno porte. Nos meses de julho a novembro, correspondentes ao período de estiagem, o número de dunas barcanas é significativamente maior, indicando controle climático.



Figura 5. Duna barcana na superfície praiial próximo ao Rio Novo. Apresenta 15 m de largura, 3 m de comprimento e 0,6 m de altura. Observam-se estruturas de fluxo de grãos próximos a escala. Figura retirada de Gonçalves *et al.* 2003.

Como observou Gonçalves *et al.* (*op. cit.*), as ocorrências de dunas barcanas em regiões próximas (pós-praia) e relativamente afastadas (interior) do litoral contrastam em dimensões e taxas de migração. As do pós-praia alcançam alturas de até 1,5 metro e taxas de

migração de até 100 metros em um ano; as do interior dos campos de dunas alcançam até 15 metros de altura e taxas de migração de cerca de 15 metros/ano.

À título de comparação, deve-se observar as características do campo de pequenas barcanas encontrado por Herrmann *et al.* (2006), localizado na vizinhança da pequena vila de Atins (MA), à apenas 1 km do mar. Segundo ele, esse campo se estende da praia até o campo de dunas transversais maiores. Suas observações apontam para barcanas variando de 20 cm até 1 m ou mais, que desenvolvem-se em superfície plana com pouca disponibilidade de areia, o que condiz com os dados constatados por Gonçalves *et al.* (*op. cit.*) (fig. 6).



Figura 6. Fino lençol de areia e campo de pequenas dunas barcanas. Figura retirada de Herrmann *et al.*, 2006.

Herrmann *et al.* (*op. cit.*) concluiu que o campo de pequenas dunas barcanas representa o início dos Lençóis Maranhenses. Segundo ele, essas barcanas aumentam de tamanho e, posteriormente, barcanóides são formadas a partir da junção dos braços/chifres das

barcanas. Conforme Gonçalves *et al.* (*op. cit.*), na medida em que a disponibilidade de areia aumenta, dunas transversas com maior invariância lateral surgem.

2 GEOLOGIA REGIONAL E TECTÔNICA

Os extensos depósitos de areia dos Lençóis Maranhenses se encontram no âmbito da Bacia Sedimentar Barreirinhas, com idade cretácea, na região de domínio de dois compartimentos geológicos principais, que apresentam características geocronológicas, tectônicas e sedimentares distintas. Enquanto ao sul estende-se a ampla bacia intracratônica do Parnaíba, ao norte ocorrem as bacias mesozoicas tipo rifte da margem continental, representadas pelo gráben de Ilha Nova e pela Bacia de Barreirinhas (fig. 7). Esses dois domínios são separados pelos arcos tectônicos de Ferrer-Rosário-Bacaba e Urbano Santos, cujo soerguimento favoreceu a erosão do pacote superior da sequência sedimentar da Bacia do Parnaíba, e cuja influência na evolução das bacias da margem continental foi muito grande (Gastão e Maia 2010 apud Hasui *et al.* 2012).

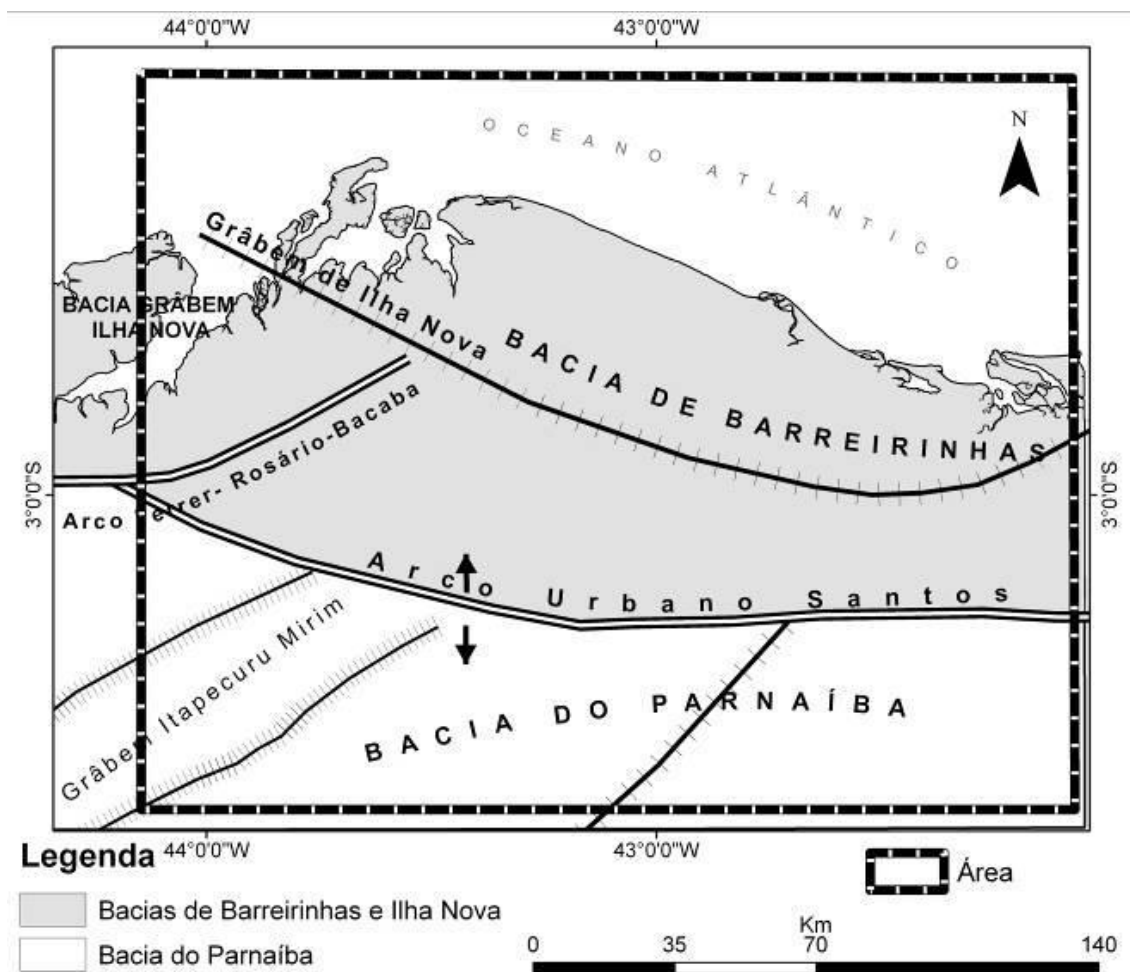


Figura 7. Mapa da compartimentação tectônica da região das bacias de Barreirinhas e Parnaíba (Gastão e Maia 2010, modificado de CPRM, 2000).

Segundo Trosdorf Junior *et al.* (2007), a bacia de Barreirinhas ocupa uma área de aproximadamente 46.000 km², dos quais 8.500 km² são emersos, com a porção marítima estendendo-se até a cota batimétrica de 3.000 metros. Trosdorf Junior *et al.* define os limites reconhecidos da bacia como sendo caracterizados à leste, pelo Alto de Tutóia, que representa o limite da bacia de Barreirinhas com a Sub-bacia de Piauí-Camocim (Bacia do Ceará); à sul, pelo embasamento raso através de falhas de borda que a separam a bacia de Barreirinhas da Plataforma de Sobradinho; à oeste, pela Plataforma de Ilha de Santana, que constitui uma barreira a partir da qual a bacia estende-se para as águas rasas e profundas; e à noroeste, onde no momento o limite da bacia é arbitrário e tem sido classicamente referido ao meridiano de 44° O, uma vez que nesta região não existe nenhuma feição geológica que justifique a separação das bacias de Barreirinhas e Pará-Maranhão.

2.1 Evolução tectônica da região Norte e Nordeste do Brasil

Importantes mudanças na tectônica global marcaram o Período Cretáceo e iniciaram a ruptura do Supercontinente Pangea que dominava a paisagem naquela época. Em torno de 200 Ma atrás, a estabilidade então presente foi interrompida pelo evento magmático CAMP (*Central Atlantic Magmatic Province*) (Marzoli *et al.*, 2000; Hames *et al.*, 2003; McHone, 2000; 2002; 2006, apud Hasui, 2012). Segundo Soares Jr. *et al.* (2008, p. 671), a região da Foz do Amazonas, sudeste do Pará, sudoeste do Maranhão, a região norte do Estado de Roraima e as áreas adjacentes dos países vizinhos, experimentaram soerguimento ligado a anomalias térmicas do manto astenosférico, seguido de magmatismo e rifteamento.

No Jurássico, o magmatismo e o soerguimento foram sucedidos pela formação de riftes, seguindo direções impostas por junções tríplices associadas aos *hotspots* que originaram o Oceano Atlântico Central (Morgan apud Soares Jr. *et al.* 2008). Como consequência, as áreas adjacentes à Bacia do Parnaíba e Gráben Calçoene foram soerguidas.

Ao longo do Período Cretáceo registrou-se um grande número de modificações nas feições da região norte-nordeste do Brasil, culminando na formação de várias bacias e ,finalmente, com a separação da África e da América do Sul. No Aptiano ocorreram eventos de soerguimento e rifteamento que se iniciaram no interior da América do Sul. À leste da Bacia de Marajó, o Arco Ferrer-Urbano Santos se individualizou devido a nova atividade magmática na região. O soerguimento ligado ao magmatismo ocasionou a exposição de unidades paleozóicas da Bacia do Parnaíba, rochas pré-silurianas e rochas do embasamento cristalino. Essas rochas foram intensamente erodidas, tornando-se áreas fonte de sedimentos para os depocentros adjacentes. No final do Aptiano, houve subsidência regional na região do

Arco Ferrer-Urbano Santos, acompanhada de transgressão que corresponde a formação do "Mar Epicontinental Codó" na Bacia Grajaú (Soares Jr. *et al.* 2008).

O Albiano foi marcado pela instalação do regime extensional que deu origem às bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas, e que culminou na separação dos continentes Sul-Americano e Africano (fig. 8). Segundo Soares Jr. *et al.* (*op. cit.*), o Arco Ferrer-Urbano Santos experimentava erosão e servia como mais uma área fonte de sedimentos para as bacias adjacentes, com sistemas de drenagens instalados nas direções N-S e ENE-WSW, interagindo com o "Mar Itapecuru I", ligado à transgressão marinha nas Bacias de São Luís e Ilha Nova. Soares Jr. *et al.* (*op. cit.*) ainda afirma que rifteamento que formou o Atlântico Equatorial estava se propagando da Bacia do Ceará em direção ao nordeste, formando as Bacias de Barreirinhas, onde se encontra localizado o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, e Pará-Maranhão, promovendo o desenvolvimento de suas ombreiras, a Plataforma de Ilha de Santana. Neste período ocorria também invasão marinha na Bacia de Barreirinhas.

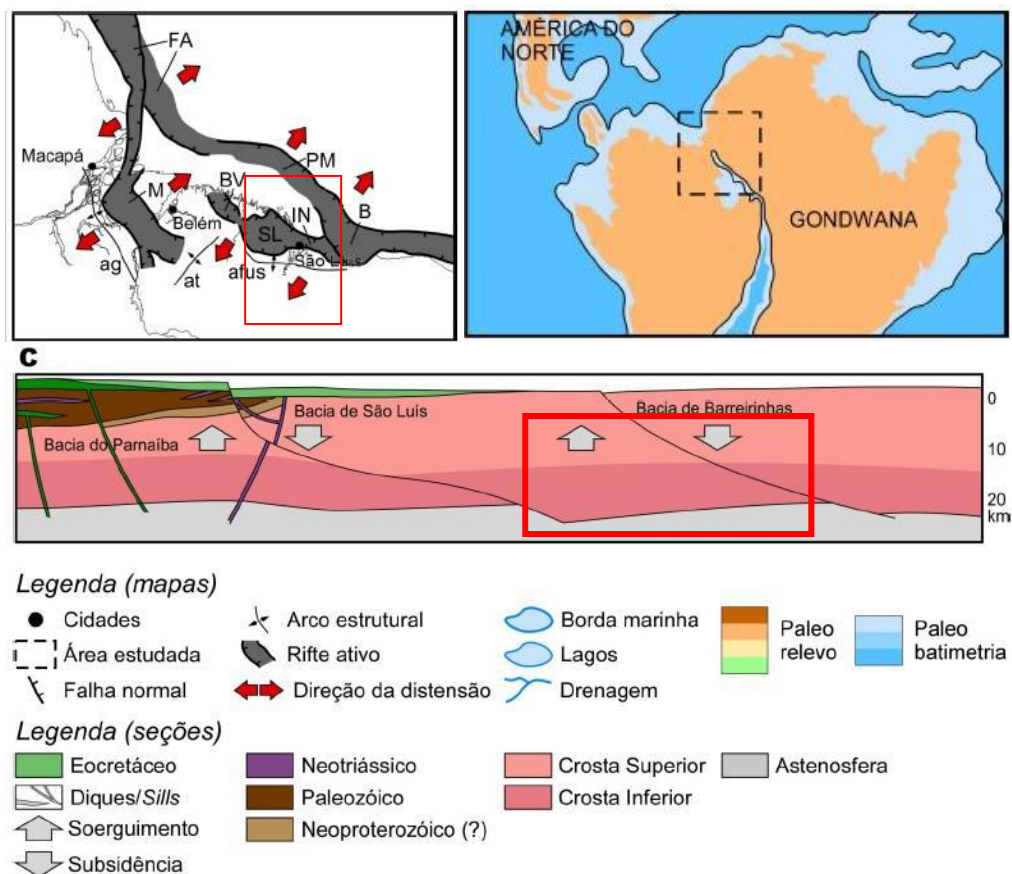


Figura 8. Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano) modificado de Soares Jr. *et al.* 2008.

FA - Bacia da Foz do Amazonas; M - Bacia de Marajó; B - Bacia de Barreirinhas; BV - Bacia de Bragança - Viseu; SL - Bacia de São Luís; IN - Bacia de Ilha Nova; PM - Bacia do Pará-Maranhão; ag - Arco de Gurupá; afus - Arco Ferrer-Urbano Santos; at - Arco do Tocantins.

O estágio rifte responsável pela formação das bacias Pará-Maranhão e Barreirinhas durou um intervalo de aproximadamente 6 Ma, e deixou grandes pacotes sedimentares com espessura de 1.800 e 3.500 metros, respectivamente. Esses grandes depósitos acumulados em um intervalo de tempo tão curto demonstram a grandiosidade dos eventos de rifteamento, assim como evidenciado também por grábens estreitos muito profundos e de soerguimento. O então recém-formado Atlântico Equatorial exercia pouca influência e mal trazia massas úmidas, o que ocasionou o domínio do clima semi-árido no período, onde não havia nenhum grande sistema de drenagem desenvolvido. Dada à aridez da região, a fonte sedimentar das bacias adjacentes correspondia às regiões próximas soerguidas no próprio evento de rifteamento, ou seja, as ombreiras das bacias. Vale ressaltar que a ombreira da Bacia de Barreirinhas correspondia ao Arco Ferrer-Urbano Santos.

No Neocretáceo, as fases rifte cessaram-se no interior do continente Sul-Americano. Segundo Soares Jr. *et al.* (2008), todo esforço extensional se concentrou no Atlântico Equatorial, nas Bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas, que evoluíram para margem passiva (fig. 9). O Arco Ferrer-Urbano Santos já encontrava-se sem relevo na região.

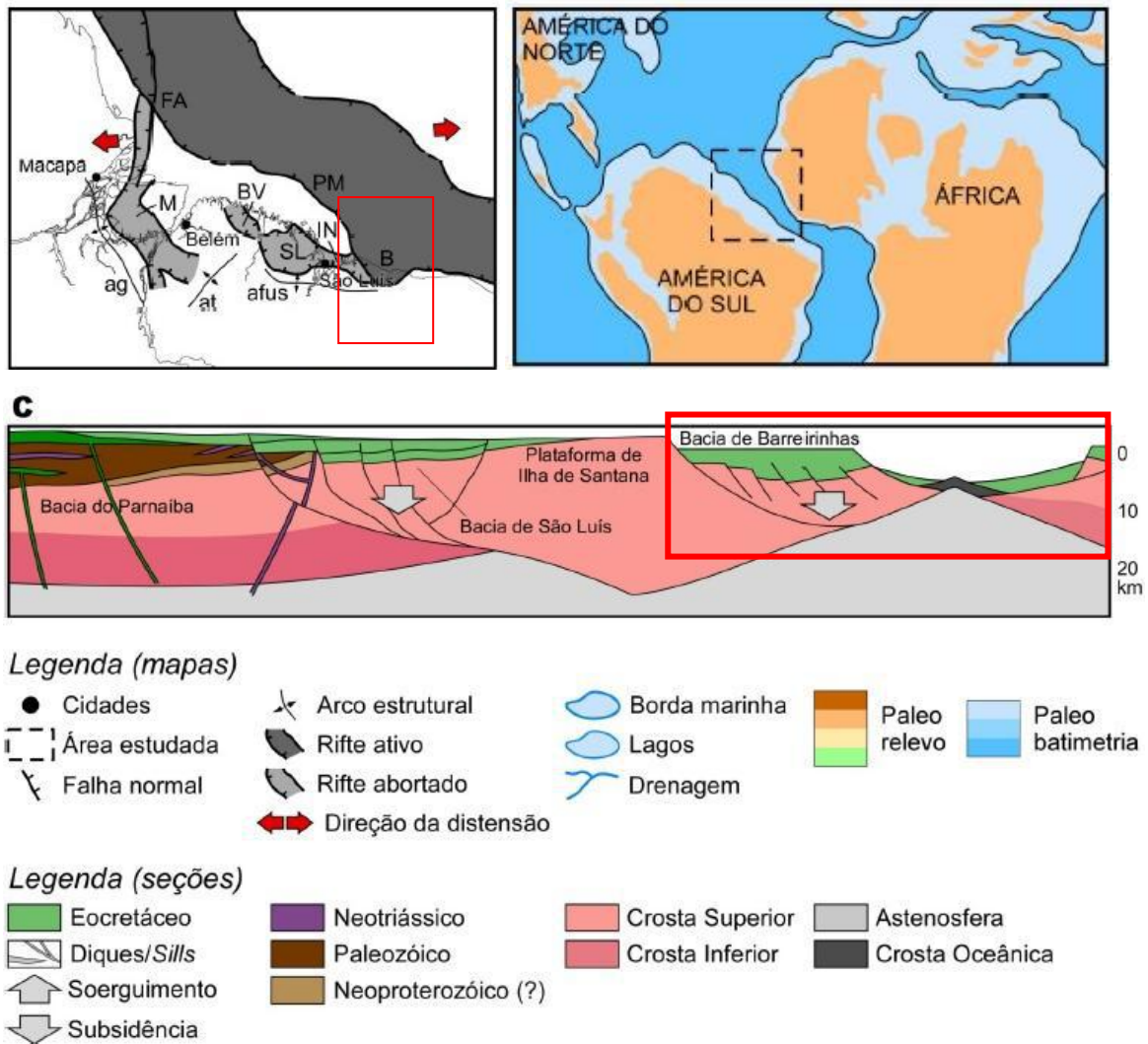


Figura 9. Mapa paleogeográfico do Neocretáceo (Turoniano) modificado de Soares Jr. *et al.* 2008. FA - Bacia da Foz do Amazonas; M - Bacia de Marajó; B - Bacia de Barreirinhas; BV - Bacia de Bragança - Viseu; SL - Bacia de São Luís; IN - Bacia de Ilha Nova; PM - Bacia do Pará-Maranhão; ag - Arco de Gurupá; afus - Arco Ferrer-Urbano Santos; at - Arco do Tocantins.

Soares Jr. *et al.* (*op. cit.*) afirma que ao longo do Período Paleógeno, o Eoceno registrava feições de sistemas erosivos, vinculadas a sistemas de drenagem. O intervalo Eoceno-Oligoceno marcou a fase mais intensa de colisão entre as placas Sul-Americana e Nazca, resultando na instalação da cadeia andina. A ascensão gradual dos Andes pode ter promovido distintas etapas na reorganização dos cursos fluviais, contudo, o Oceano Atlântico Central já apresentava uma configuração muito próxima da atual.

Após um expressivo intervalo sem maiores mudanças no contexto da Bacia Barreirinhas, pode-se afirmar que a transição Pleistoceno-Holoceno deu origem ao atual quadro ambiental do litoral das regiões nordeste do Estado do Pará e noroeste do Estado do

Maranhão, há cerca de 17.400 anos AP. Nesse período, o quadro tectônico se estabilizou, o que permitiu o desenvolvimento do perfil laterítico imaturo na região. As glaciações do final do Pleistoceno exerceram forte influência local, uma vez que o nível do mar abaixou e expôs o planalto costeiro e a plataforma continental. Sistemas de vales fluviais e processos de erosão subaérea incidiram sob o continente exposto. De acordo com Soares Jr. *et al.* (2008), a subida contínua do nível do mar durante o Holoceno, provocou o afogamento de parte das planícies costeiras e a modelagem de falésias em depósitos do Grupo Barreiras. Segundo Bartorelli *et al.* 2010 apud Hasui *et al.* 2012, uma das fontes mais significativas para as areias das dunas litorâneas dos Lençóis Maranhenses são os sedimentos do Grupo Barreiras, principalmente durante essas épocas glaciais como do Pleistoceno-Holoceno. O nível de mar transgressivo mais alto do Holoceno é marcado por lençóis de areia com fragmentos de conchas, há cerca de 5.200 anos.

2.2 Geologia regional do PNLN

A Bacia de Barreirinhas, que abriga os sedimentos do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, foi formada na margem equatorial durante o Cretáceo Inferior a partir do rifte que causou a separação da América do Sul e África e que, conseqüentemente, deu origem à criação do Oceano Atlântico (Veiga Junior, 2000). Segundo Gastão e Maia 2010 apud Hasui *et al.* 2012, a Bacia Barreirinhas é constituída por três megasequências, correspondentes às fases pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte.

No trabalho produzido por Vieira *et al.* 2015, é possível encontrar uma breve descrição sobre os depósitos da Bacia de Barreirinhas. Segundo ele, o embasamento cristalino da Bacia contém gnaisses, granitos e quartzo mica xistos de idade Precambriana. "O pacote de sedimentos cretáceos (terrígenos continentais clásticos) do Grupo Canárias (Feijó 1994) de idade Albiana sobrepõe essas rochas. Próximo, o Grupo Caju representa uma sequência marinha transicional caracterizada por clásticos e carbonados de idade Albi-Cenomaniana (100 MA), representando o começo da sedimentação marinha na bacia. Essas sequências são separadas por discordâncias causadas por declínios do nível do mar. De acordo com Feijó (*op. cit.*), o Grupo Humberto de Campos, que sobrepõe o Grupo Caju, engloba folhelhos, arenitos finos e carbonatos que representam a fase passiva do processo tectônico da bacia. A Formação Pirabas (Cretáceo Superior/Terciário) está sobre esse grupo e corresponde a camadas de rocha de 3.500 metros de espessura compostas por conglomerados, arenitos marinhos e continentais, folhelhos e calcários marinhos que se desenvolveram ao longo da bacia e cobriram os sedimentos cretáceos (Pamplona 1969). Os afloramentos da Formação Pirabas se encontram

em áreas restritas da bacia. A sequência Quaternária, formada por sedimentos depositados em ambiente fluvial, costeiro e eólico, se dispõe em disconformidade sobre a espessa camada de rochas cretáceas e terciárias. Os sedimentos quaternários da Formação Açuí são predominantemente areias quartzosas e cobrem toda a Bacia Barreirinhas. A espessura máxima da Sequência Quaternária varia entre 15 a 50 metros (Pamplona 1969)" (Vieira *et al.* 2015).

O registro sedimentar da Bacia de Barreirinhas foi detalhadamente descrito por Feijó (*op. cit.*), a serviço da PETROBRÁS, essencialmente através de dados de subsuperfície, incluindo 121 poços (97 em terra) e 46.000 km de seções sísmicas. Em anexo a esse trabalho encontram-se a Carta Estratigráfica e a Coluna Estratigráfica da bacia de Barreirinhas presentes no trabalho de Trodstorf *et al.* (2007). Segue abaixo a descrição sedimentar proposta por este trabalho de Feijó:

Grupo Canárias - consiste de arenito lítico cinza-claro, fino a grosso, imaturo, siltito cinza a castanho-avermelhado e folhelho cinza-médio a esverdeado. Fazem parte do Grupo Canárias os folhelhos escuros da Formação Arpoador, os arenitos grossos cinzentos da Formação Bom Gosto, os folhelhos escuros da Formação Tutóia e os arenitos médios cinzentos da Formação Barro Duro. Este conjunto foi depositado por leques deltaicos em ambiente marinho. A bioestratigrafia, com base em foraminíferos plantônicos e palinórfos, indica idade eo/mesoalbiana para esta unidade (Regali *et al.* 1985).

Grupo Caju - formado por calcarenito bioclástico e oncolítico (Formação Bonfim) e calcilito creme (Formação Preguiças), sedimentados em ambiente nerítico de alta e baixa energia. A idade neoalbiana provém de datações por palinórfos (Regali *et al.* (*op. cit.*)), e foraminíferos plantônicos.

Formação Peria - definida por Pamplona (1969) como Membro Peria, nomeia os clásticos sotopostos e associados aos carbonatos das formações Bonfim e Preguiças. Esta formação caracteriza-se por folhelho cinzento, com calcarenito creme subordinado. As poucas datações bioestratigráficas disponíveis nesta seção apontam para uma idade neoalbiana (Regali *et al.* (*op. cit.*)). Admite-se para esta unidade uma deposição em ambiente marinho raso.

Grupo Humberto de Campos - foi destacado do Grupo Caju, onde havia sido incluído por Pamplona (*op. cit.*) como formação; os membros Areinhas, designando os clásticos grossos, e

Ilha de Santana, os carbonatos de alta energia, foram promovidos a formação; e foi definida a Formação Travosas, para designar os folhelhos escuros e arenitos finos intercalados, sotopostos e lateralmente situados aos carbonatos da Formação Ilha de Santana. A unidade está presente ao longo da faixa da bacia mais distante do litoral, tendo sido depositada em ambiente marinho profundo, batial e abissal. As datações por palinomorfos indicam idade do Turoniano ao Oligoceno (Regali *et al.* 1985).

2.2.1 Ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Barreirinhas

Como grande parte da obtenção das informações ligadas à geologia regional da Bacia de Barreirinhas está diretamente associada à pesquisa e exploração de hidrocarbonetos na região, vale a pena uma curta revisão do histórico desses produtos nas rochas locais.

Trosdorf *et al.* (2007) afirma que a exploração da Bacia de Barreirinhas foi concentrada nas décadas de 60, 70 e 80 (fig. 10). Nesse período foram encontrados resultados pouco encorajadores e, em função disso, a exploração da bacia encontrou-se suspensa por mais de 20 anos. Conforme estabelecido pelo histórico exploratório apresentando pela ANP na 11^a Rodada de Licitações de Petróleo e Gás, de 2000 até o presente vem ocorrendo o chamado Terceiro Ciclo Exploratório da Bacia de Barreirinhas, com perfuração de 3 poços em águas profundas e levantamentos sísmicos 2D e 3D.

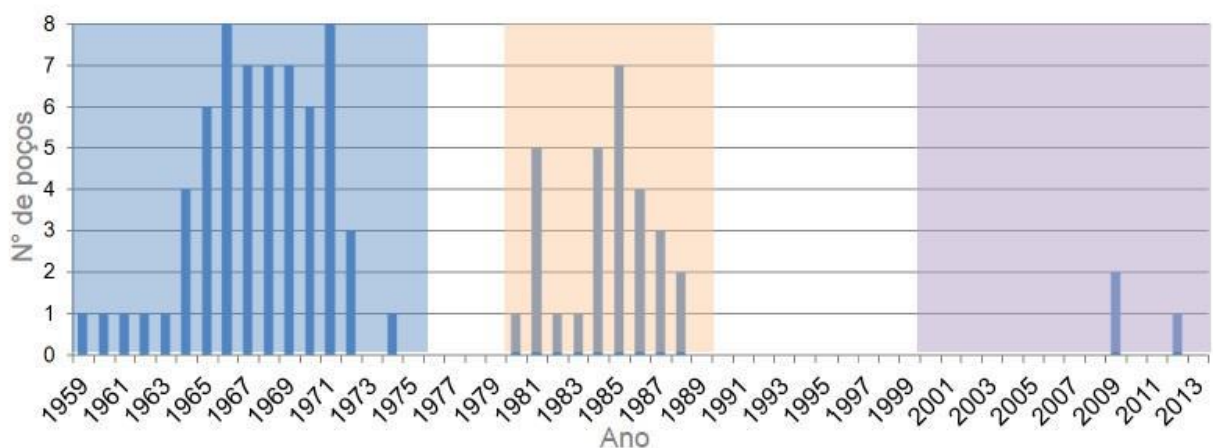


Figura 10. Gráfico de número de poços vs. ano. Figura retirada de ANP (2013).

Em maio de 2013, na cidade do Rio de Janeiro, ocorreu a 11^a Rodada de Licitações promovida pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Foram ofertados 289 blocos pertencendo à 11 bacias sedimentares brasileiras, incluindo a Bacia de

Barreirinhas. 26 Blocos exploratórios foram ofertados, correspondendo à aproximadamente 13.000 km² da parte imersa na Bacia de Barreirinhas. Foram estipuladas ocorrências de óleo e gás, sendo que a presença de gás natural corresponde a > 57% dos hidrocarbonetos encontrados.

Conforme estabelecido por Ferreira (2013) na 11^a Rodada da ANP, foi observada a presença de 3 sequências de rochas geradoras e 3 de rochas reservatório na bacia de Barreirinhas. São rochas geradoras a Formação Codó (Aptiano), Fm. Preguiças (Cenomaniano) e Fm. Travosas (Cenomaniano - Turoniano). As rochas reservatório são os arenitos da Fm. Tutóia do Mesoalbiano e da Fm. Bom Gosto do Eoalbiano, além dos turbiditos da Fm. Travosas (Terciário - Eocretáceo).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelagem de sistemas naturais

Paisagens geológicas variam em sua sensibilidade e habilidade de recuperação de mudanças em sua magnitude, e de frequência de processos externos. Uma paisagem onde a vegetação é crítica para a estabilização de encostas, como feições sedimentares feitas de material fraco e arenoso de um sistema dunar, pode ser muito sensível, por exemplo, a mudanças climáticas. A evolução da paisagem do campo de dunas modifica suas características em uma variedade de escalas de tempo, desde eventos instantâneos aos que duram milhões de anos.

Para auxiliar no entendimento de sistemas naturais, como os processos geológicos e geomorfológicos, estudiosos utilizam modelos físicos em laboratório onde é possível controlar e verificar respostas às mudanças em condições de contorno do conjunto. Esses modelos físicos são considerados análogos dos sistemas naturais, levando em conta elementos das ciências de campo e laboratório. Os resultados dos estudos podem ser muito úteis, porém existem limitações (Bierman e Montgomery, 2015).

Modelos de evolução da paisagem podem ser conceituais, físicos ou matemáticos. Mais especificamente, o presente trabalho se trata de um modelo físico usando o modelo matemático estipulado por Herrmann & Sauermann (2000) como base teórica. De acordo com Biermann e Montgomery (*op. cit.*), modelos físicos nos permitem experimentos com o comportamento de sistemas de maneira controlada, usando sistemas análogos em escalas onde nós possamos medir características ou taxas de interesse particular, relevância ou importância. Segundo ele, modelos matemáticos, como o desenvolvido por Herrmann & Sauermann (*op. cit.*), formalizam o comportamento do sistema e suas interações usando equações, e permitem a computação de relações entre processos e formas.

Os objetivos do estudo, os fatores que se deseja variar, o nível de detalhismo e realismo desejados determinam a escolha apropriada do modelo de evolução. Esses modelos servem para aprimorar o entendimento de sistemas geomorfológicos e prever melhor seu comportamento (Bierman e Montgomery, 2015).

A execução dos modelos físicos, como o realizado no presente estudo, encontra grandes desafios ligados à redução de escala e simplificação. Segundo Bierman e Montgomery (*op. cit.*), modelos físicos geralmente envolvem mudanças na escala de tamanho

das estruturas modeladas, uma vez que construir um sistema em tamanho original é impraticável para a maior parte dos casos. Se o tamanho do sistema sendo modelado requer redução na escala, então os materiais que compõe o modelo também necessitam de redução na escala. Problemas de escala envolvem não somente as dimensões do sistema modelado e seus componentes, mas também suas propriedades físicas, como por exemplo, a densidade e viscosidade do fluido. Inevitavelmente, concessões são necessárias (Bierman e Montgomery, 2015).

Já para os modelos matemáticos como o modelo de Herrmann & Sauermann (2000) utilizado neste trabalho, o problema mais comum a ser encontrado consiste no fato de que a maioria das medições de campo do transporte de sedimentos ou mudanças na paisagem são uma amostra em escala de tempo bem menor do que a necessária para formar esta paisagem. Isso complica a calibração das taxas parâmetro e torna difíceis as relações entre essas taxas e processos geomorfológicos (Bierman e Montgomery (*op. cit.*)).

A complexidade associada aos modelos executados neste estudo e ao sistema sedimentar natural do campo de dunas faz com que problemas associados à execução da pesquisa sejam encontrados. Concessões e adaptações foram feitas durante a análise dos resultados obtidos no estudo com o intuito de minimizar os erros associados a esta modelagem.

3.2 O modelo matemático de Herrmann e Sauermann (2000)

O presente estudo visa a reprodução em escala reduzida do modelo matemático e simulações computacionais apresentados por Herrmann e Sauermann (2000), sobre o desenvolvimento de dunas barcanas. De maneira simplificada, os autores definem no artigo equações para descrever a formação de dunas barcanas e, a partir dessas equações, geram simulações computacionais dessas dunas que se iniciam como uma superfície Gaussiana.

Como visto anteriormente, Herrmann e Sauermann apresentam modelos baseados em equações diferenciais para descrever a dinâmica de superfícies feitas por uma camada granular seca, como a superfície desértica. Segundo os autores, ainda sabe-se muito pouco sobre as equações de movimento que controlam a evolução de superfícies livres compostas de areia. Nos últimos anos diversas equações foram formuladas, porém, por causa de suas simplificações, suas aplicabilidades são restritas a certas configurações. Ainda conforme Herrmann e Sauermann, era necessário gerar um modelo que incluísse a união entre velocidade do vento e a velocidade dos grãos na descrição do processo formador de dunas.

No modelo de Herrmann e Sauermann para a evolução de superfícies governadas pela ação do vento, são separadas as massas totais de areia que pertencem à parte estática da duna e à parte móvel, que corresponde a uma camada que se movimenta sobre a parte estática, uma vez que, em desertos, o fluxo de areia na superfície ocorre em uma camada grãos.

Abaixo encontram-se descritas as equações estabelecidas por Herrmann e Sauermann (2000), que podem ser encontradas mais detalhadamente em seu artigo. Para descrição de conservação de momentum e massa nas duas partes da massa total da areia, podem-se adotar as seguintes equações:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \text{div } \rho_i \mathbf{u}_i = +\Gamma_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + (\mathbf{u}_i \nabla) \mathbf{u}_i = \frac{1}{\rho_i} \mathbf{f}_{\text{ext}}, \quad (2)$$

Onde o termo Γ_i denota troca de massa entre essas duas partes da massa total de areia e \mathbf{f}_{ext} denota as forças externas ao sistema. O termo \mathbf{u} corresponde à velocidade das partículas de areia e o termo t ao tempo decorrido.

Para a porção estática da areia, a equação de altura definida pelos autores é:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\Gamma \quad (3)$$

Para a porção móvel da areia, a equação que descreve a espessura possui a seguinte forma:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \text{div } R \mathbf{u} = +\Gamma, \quad (4)$$

onde $R = R(x, y, t)$ equivale a quantidade de partículas em movimento.

Conforme Herrmann e Sauermann (2000), a equação da velocidade $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, t)$ da camada móvel é usada para unir as forças externas ao sistema de grãos móveis e é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = +(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = \frac{1}{\tau}(\mathbf{v} - \mathbf{u}) - g \text{ grad } h - \gamma \mathbf{u}. \quad (5)$$

Para modelar a taxa de erosão e deposição Γ , Herrmann e Sauermann (*op. cit.*) consideram dois diferentes mecanismos de transporte e, portanto, dividem a taxa de troca em duas partes:

$$\Gamma = \begin{cases} \Gamma_{\text{luv}} & |\mathbf{v}| > v_t, \\ \Gamma_{\text{lee}} & , \end{cases} \quad (6)$$

onde v_t denota a velocidade limiar do vento necessária para transportar qualquer grão.

Em barlavento (ou *luv* em inglês), a taxa Γ é descrita como:

$$\Gamma_{\text{luv}} = \Gamma_0 \text{ div } \mathbf{u} + \Gamma_1 \mathbf{u} \text{ grad } h \quad (7)$$

onde $\text{grad } h$ equivale a curva da superfície.

Para sotavento (ou *lee* em inglês), os autores definem a equação como:

$$\Gamma_{\text{lee}} = \Gamma_2 R(|\text{grad } h| - \tan \Theta), \quad (8)$$

onde Γ_2 é uma constante usada como um parâmetro do modelo para determinar a forma da face de escorregamento.

É importante destacar que Herrmann e Sauermann consideram para seu modelo um campo de ventos que vêm sempre da mesma direção com uma velocidade v_0 constante. Este campo de ventos é uma forma simplificada se comparada ao sistema real dos ventos de um campo de dunas. Para estas velocidades simplificadas do vento são assumidas as seguintes regras:

$$\mathbf{v} = \mathbf{e}_x \begin{cases} v_0 + v_a h & \frac{\partial h}{\partial x} \geq 0, \\ 0 & \text{demais.} \end{cases} \quad (9)$$

A partir dessas simples regras, os autores determinaram o uso das equações definidas anteriormente para três dimensões, dando início a uma simulação

computacional com início em uma curva de forma Gaussiana e levando em conta um aporte de areia constante nas bordas de onde o vento vem (fig. 11 e 12).

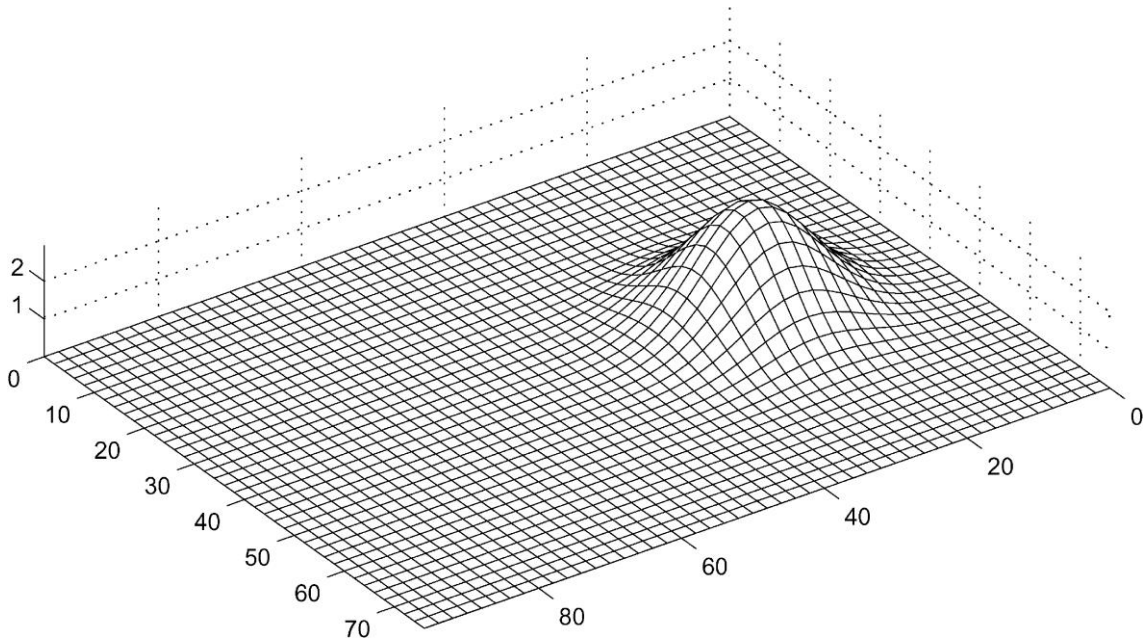


Figura 11. Curva de forma Gaussiana usada para a simulação do modelo de Herrmann e Sauermann (2000), Herrmann e Sauermann (2000).

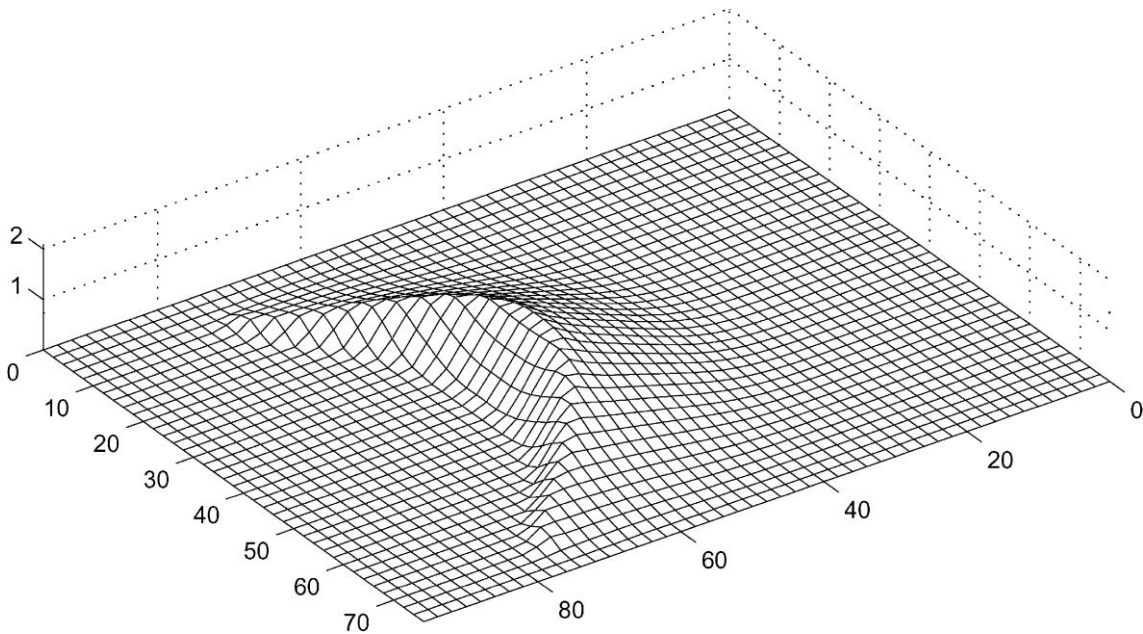


Figura 12. Superfície simulada após 50 000 interações utilizando o modelo de Herrmann e Sauermann (2000), Herrmann e Sauermann (2000).

Conforme afirmam os autores, o aporte de areia usando na simulação foi necessário pois as dunas não são intrinsecamente estruturas auto sustentáveis. Segundo os autores, as dunas constantemente perdem areia pelos dois braços/chifres e tendem a desaparecer caso não sejam alimentadas por barlavento com mais areia. Eles também afirmam que este seria um bom argumento contra a hipótese de que as dunas barcanas são *solitary waves*. Contudo, em Herrmann e Schwämmle (2003), os autores descrevem matematicamente como as dunas são capazes de atravessar umas as outras e ainda manter sua forma, comportamento ao qual se dá o nome de *solitary wave*. Assim, Herrmann acaba por quebrar em 2003 a própria hipótese de que dunas não são *solitary waves* levantada em 2000 no artigo aqui referenciado.

Herrmann e Sauermaann (*op. cit.*) observam que na simulação encontrada na figura 12 é possível ver o início da forma crescente de uma duna barcana, porém alguns detalhes não se assemelham às formas reais medidas em campo. Os autores acreditam que as grandes simplificações feitas no campo de ventos da simulação sejam a principal causa das discordâncias encontradas.

Para obter dados precisos sobre as dunas, Herrmann e Sauermaann coletaram medidas no campo de dunas na região oficial do Oeste Saara Espanhol, hoje parte do Marrocos. Ao interpolar os dados medidos em campo, os autores compararam os dados reais com os do modelo simulado e, a partir do uso do *software* FLUENT, obtiveram informações detalhadas sobre o campo de ventos Marroquino. As diferenças entre o modelo simulado e o modelo Marroquino possibilitaram aos autores uma melhoria da simulação feita por eles em seu modelo matemático (fig. 12).

3.3 Morfodinâmica dunar

O processo de movimentação dos grãos de areia, que dá origem as dunas, é governado pelo peso das partículas e pela fricção e coesão interna dos grãos. O movimento desses grãos é induzido pelo arraste e levantamento das partículas, e o impacto dos grãos já em movimento. Definem-se como movimentos de transporte de grãos os processos de saltação, arraste e suspensão (fig. 13). (Summerfield, 1991).

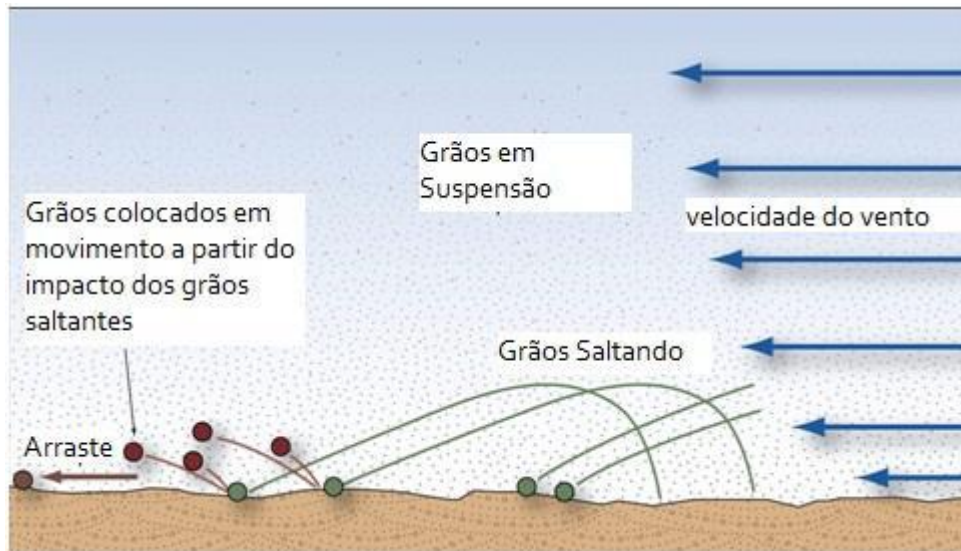


Figura 13. Processos de transporte de grãos pelo vento. São esses: suspensão, saltação e arraste. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.

Um mecanismo muito importante no transporte de sedimentos causado pela ação do vento é força de arraste resultante da diferença entre a pressão de fluido na direção de barlavento e sotavento em um fluxo de ar. Isso pode fazer com que partículas se movam na direção de sotavento por rolamento e deslizamento, o que é um processo conhecido como *Surface Creep* (arraste de superfície). Forças de arraste podem iniciar o movimento dos grãos em velocidades de vento menores do que as necessárias para levantar esses grãos, e elas podem também mover partículas muito grandes para ser levantadas pelo vento. A velocidade do vento necessária para promover o movimento através de levantamento e arraste é conhecida como *Fluid threshold Velocity* (velocidade limiar do vento) (Summerfield, *op. cit.*). Tal processo pode ser observado através dos gráficos da figura 14, que demonstram as velocidades do vento necessárias para mover grãos de diferentes granulometrias, além de mostrar as formas deposicionais resultantes desses processos de transporte de sedimentos.

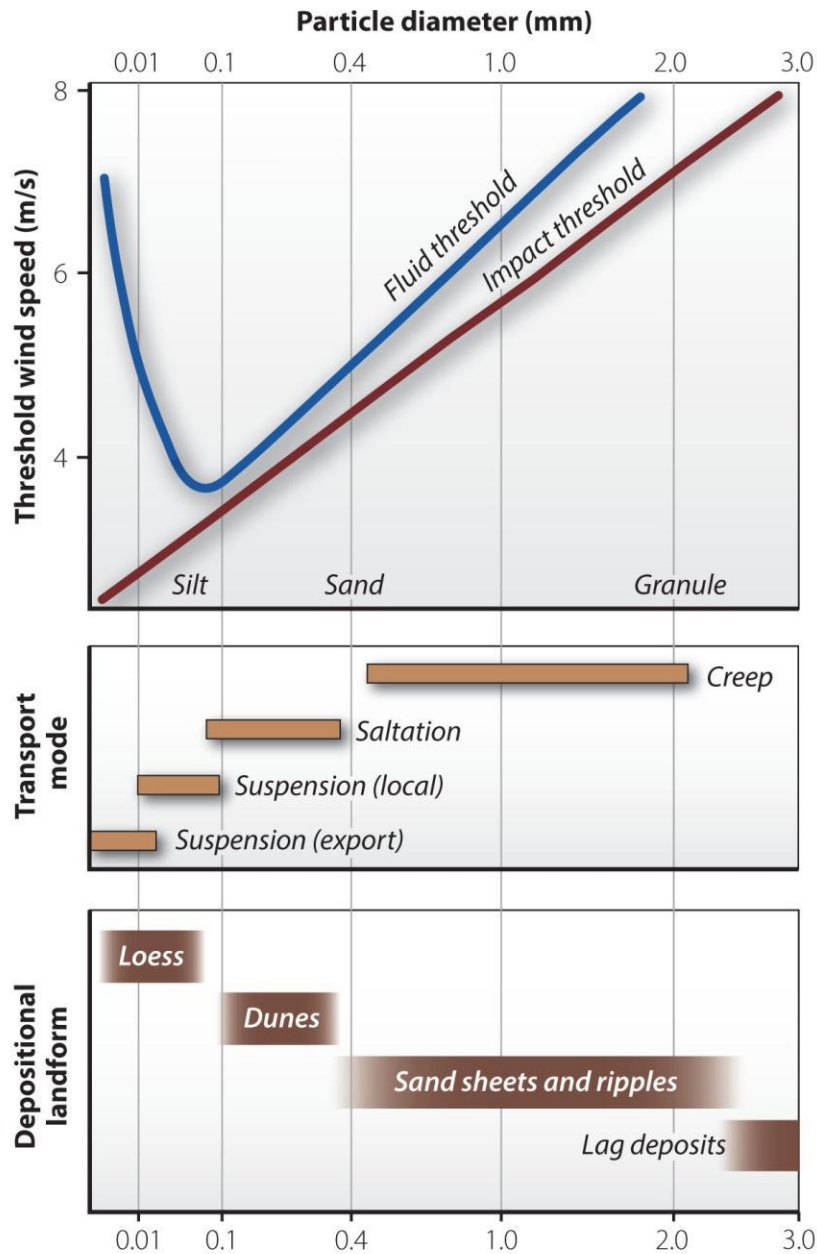


Figura 14. Gráficos de associação entre a velocidade do vento necessária para gerar movimento dos grãos, a forma de transporte dos grãos e as formas deposicionais resultantes desse transporte com relação à granulometria das partículas. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.

Segundo Bierman e Montgomery (2015), essa simples imagem é altamente complicada pela turbulência. Os fluxos de ar são raramente uniformes. São de fato caracterizados por rajadas de maior velocidade de fluxo que podem momentaneamente produzir bolsas de baixa pressão acima da superfície e criar um grande potencial para levantamento e arraste. Tais variações na velocidade são particularmente importantes porque a força de arraste varia com o poder da velocidade; em outras palavras, o dobro da velocidade do vento irá produzir o quádruplo de aumento no arraste.

Se a partícula irá se mover a uma dada velocidade do vento depende de muitos fatores além do tamanho do grão; esses incluem a densidade e forma, compactação dos grãos no entorno e a quantidade de coesão entre as partículas. Contudo, para partículas secas de forma e densidade similares, há uma relação levemente direta entre o tamanho e a *Fluid Threshold Velocity* (velocidade limiar do vento), considerando a presença de uma forte correlação entre o arraste e a velocidade do vento média (fig. 14).

Para grãos de aproximadamente 0,6 mm de comprimento, a *Threshold Velocity* (velocidade limiar) necessária para causar movimento na realidade aumenta, ao passo que o tamanho das partículas diminui. Uma das razões para isto é a reduzida rugosidade superficial, e então, um menor nível de turbulência gerado por superfícies compostas de material fino. Outra razão é a maior coesão interpartículas característica de sedimentos finos que fornece uma maior resistência ao arraste. A seleção e a compactação dos grãos também afetam a sua susceptibilidade ao arraste, uma vez que partículas pequenas podem ser protegidas do fluxo de ar por partículas maiores (fig. 15) (Summerfield, 1991).

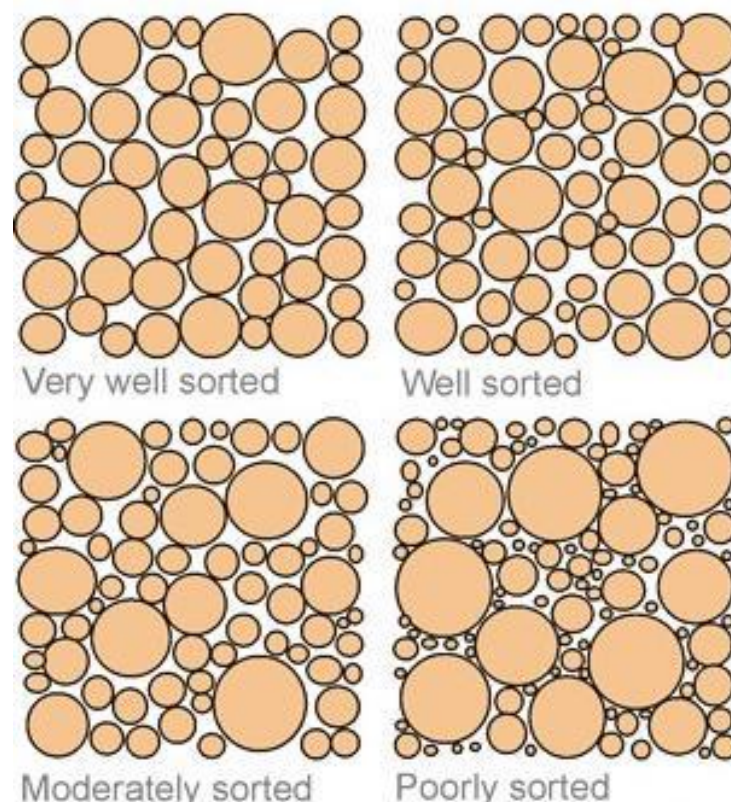


Figura 15. Graus de seleção de grãos e sua capacidade de afetar a susceptibilidade ao arraste e de mudar a rugosidade de uma superfície. Disponível em:

<https://www.imperial.ac.uk/earthscience.andengineering/rocklibrary/viewglossrecord.php?gID=00000003>

03 . Acesso em 24/11/15.

Partículas de até 0,4 mm de diâmetro podem ser temporariamente levantadas no fluxo de ar antes de retornar a superfície. Como resultado desse processo de saltação, uma vez levantadas e arrastadas, é iniciado o movimento da partícula. Grãos em direção a sotavento começam a ser bombardeados por essas partículas já em movimento. Esse mecanismo de impacto balístico resulta em um *momentum* adicional nas partículas da superfície, o que significa que grãos de determinado tamanho podem ser colocados em movimento em uma velocidade do vento menor do que a necessária para iniciar o movimento (fig. 16). A diferença entre essa *Impact Threshold Velocity* (velocidade limiar de impacto) e a *Fluid Threshold Velocity* (velocidade limiar do vento) é pequena para partículas finas, mas é bem significativa para grãos maiores. Uma vez que uma rajada de vento causou um movimento inicial em algumas partículas, pode haver a continuação do movimento temporariamente, sustentado pelo impacto balístico, até mesmo depois de a velocidade do vento ter diminuído abaixo da *Fluid Threshold Velocity* (velocidade limiar do vento) (Summerfield, (*op. cit.*)).

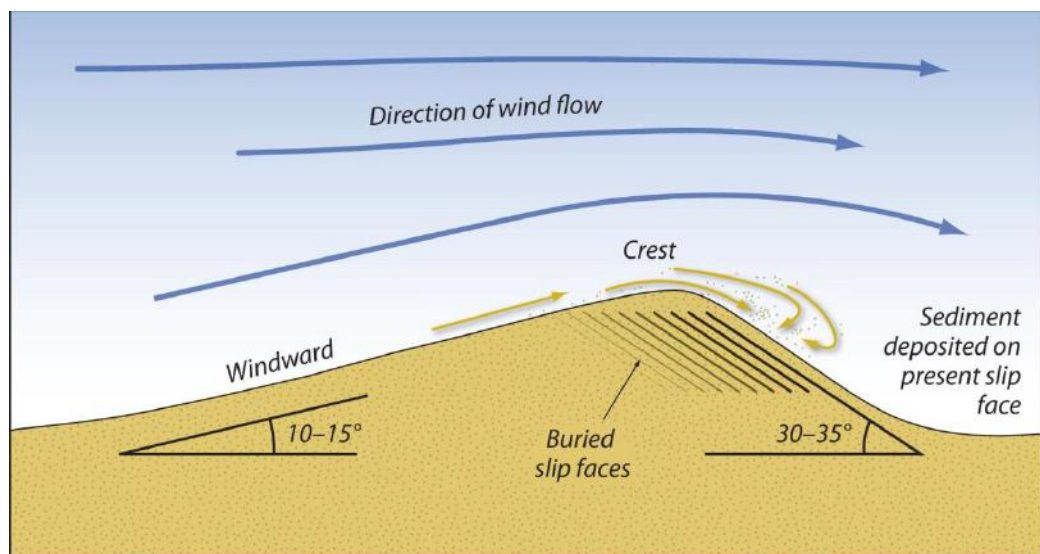


Figura 16. O vento carrega os sedimentos acima e sobre as dunas através dos movimentos de suspensão, arraste, saltação e o efeito balístico associado. Grãos saltam sobre a face de barlavento da duna e escorregam sobre a face de sotavento. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.

A saltação é o principal mecanismo de movimento da areia. Na elevação pelo fluxo de ar, grãos saltantes encontram ventos de maior velocidade e são carregados para sotavento (fig. 17). Eles retornam para a superfície através de uma trajetória determinada pelo balanço entre a gravidade e o arraste, e normalmente atingem a superfície em um ângulo entre 6° e 12°.

Depois do impacto, grãos saltantes podem pular e retornar ao ar. Eles podem também perturbar outros grãos por causa do impacto da saltação (Summerfield, 1991).

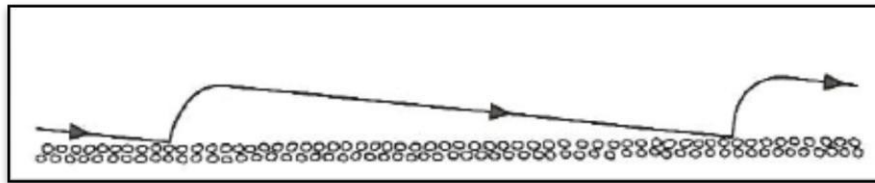


Figura 17. Trajetória de um único grão saltante. Figura retirada de Summerfield, 1991.

Os principais fatores que influenciam na taxa de transporte eólico são a velocidade e a frequência dos ventos, a eficiência de transporte desses ventos, a densidade do ar (que varia levemente com a altitude e a temperatura), a granulometria dos sedimentos e algumas características da superfície como a presença de vegetação ou obstáculo topográfico. Investigações experimentais mostraram que a taxa de transporte de areia é proporcional ao triplo da velocidade do vento. Em baixas velocidades do vento, a areia não se move. Ventos muito fortes são, contudo, muito menos frequentes que os ventos de velocidade moderada, então parece provável que a maior parte do transporte de areia de fato ocorra devido a períodos de ventos moderadamente fortes, entorno de 12-18 m/s (fig. 18) (Summerfield, (*op. cit.*)).

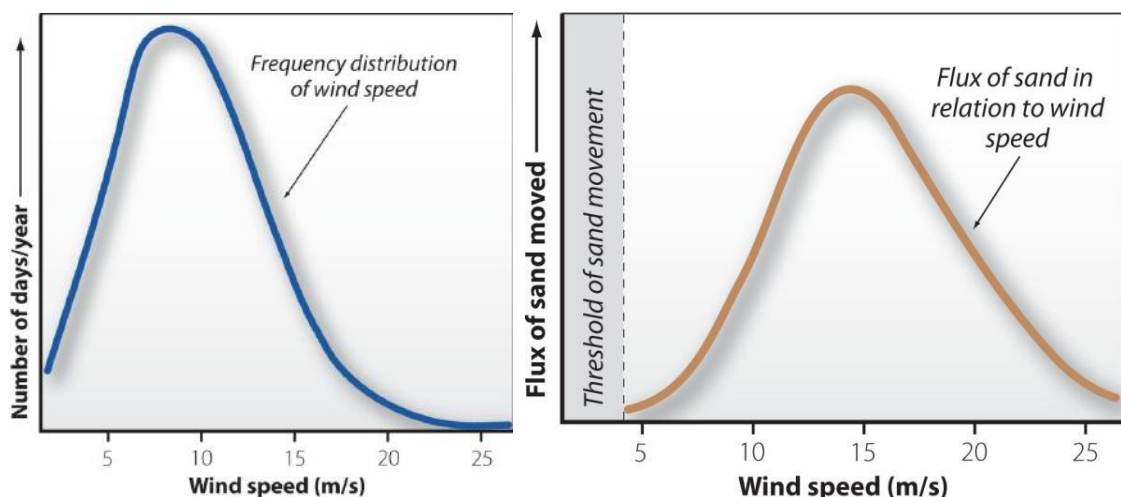


Figura 18. (esq.) Gráfico mostrando a distribuição desuniforme da velocidade do vento em um espaço de tempo. (dir.) Gráfico mostrando o fluxo de areia relativo aos ventos descritos pelo gráfico à esquerda. Figura modificada de Bierman e Montgomery, 2015.

Onde o aporte de sedimentos é escasso, a areia é totalmente removida da frente barlavento das dunas barcanóides e varrida em direção à sotavento para formar braços alongados e então criando dunas barcanas. De fato, a transição de dunas transversas para barcanas pode ser observada onde há uma queda bem marcada no fornecimento de sedimentos, sobre superfícies duras e rochosas. Uma vez formadas, as dunas barcanas geram seus próprios fluxos de ar secundários, que mantêm sua forma de equilíbrio enquanto a duna migra (fig. 19) (Summerfield, 1991). Segundo Vieira *et al.* (2015), observações de campo mostraram que o aumento na disponibilidade de areia no sistema é inversamente relacionado com a distância da fonte. Em outras palavras, a disponibilidade de sedimentos aumenta quando a distância da linha costa diminui.

Os braços ou chifres alongados das dunas barcanas são resultado de uma maior taxa de movimento da areia nas partes mais baixas, externas da duna. Eventualmente os braços se estendem suficientemente para receber proteção da crista do corpo da barcana (Summerfield, *op. cit.*). Vale ressaltar, como dito anteriormente, que dunas barcanas não são estruturas autossustentáveis. É necessário que haja alguma entrada de areia no sistema via barlavento para que a duna não desapareça, já que as barcanas constantemente perdem sedimento pelos dois braços/chifres (Herrmann e Sauermann, 2000).

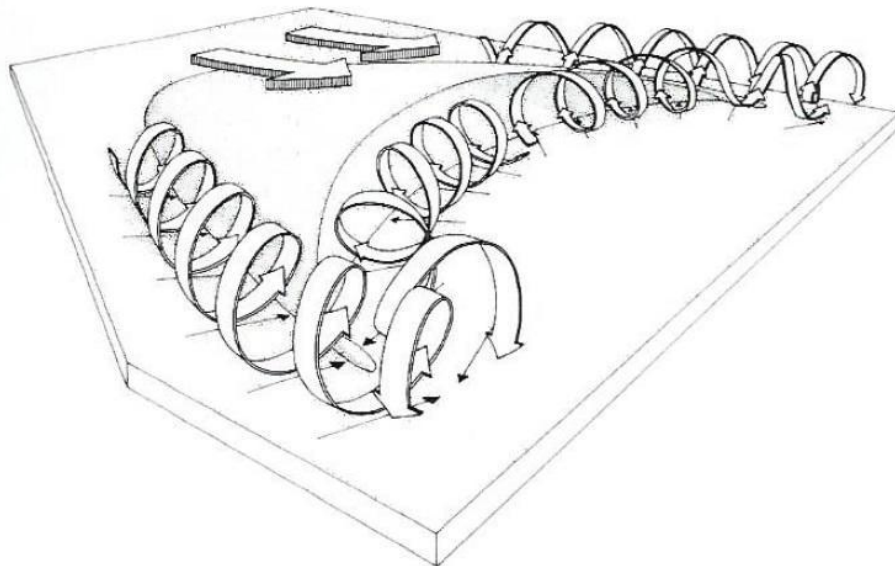


Figura 19. O padrão de fluxo de ar em uma duna barcana isolada reconstruído a partir de dados coletados em campo perto de In Salah na Argélia por P. Knott. Figura retirada de Summerfield, 1991.

4 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA

Um dos fatores mais importantes levados em conta neste trabalho é a seleção e a preparação das amostras utilizadas. Para manter fidelidade às características dos sedimentos do PNLN, foi realizado um trabalho de campo para os Lençóis Maranhenses no mês de setembro de 2014 pelo colega e colaborador do trabalho, Pedro Henrique Calçada de Medeiros. A quantidade coletada corresponde à aproximadamente 5kg de amostra e sua localização de coleta pode ser observada na figura 20.

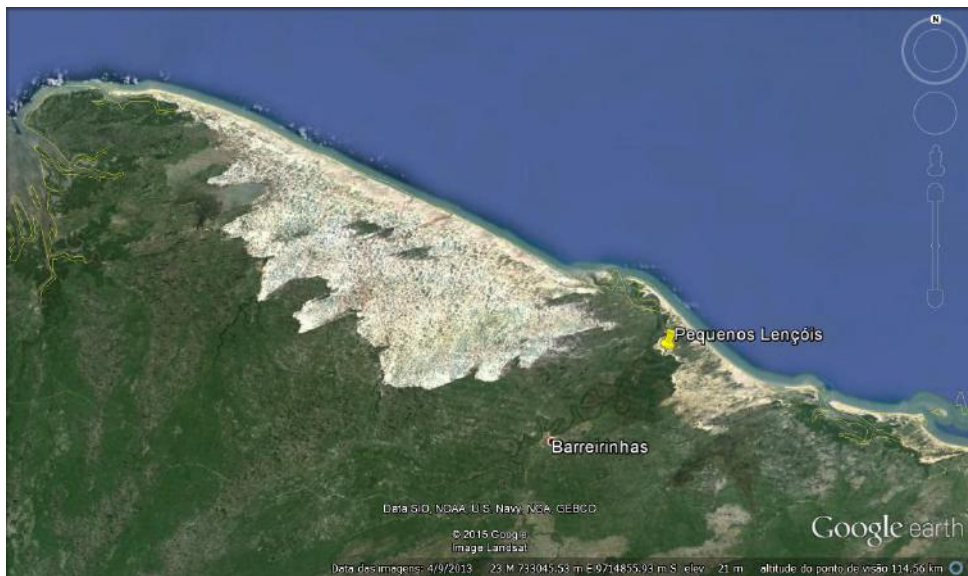


Figura 20. Ponto amostrado no PNLN. Coordenadas 757072 E e 9706914 S. Fonte: Google Earth. Figura retirada de Medeiros, 2015.

A amostra passou então por um processo de quantificação do conteúdo de sal presente, que foi realizado com o auxílio de um condutímetro (fig. 21). Lewis e Perkin (1981) definiram que é possível calcular a salinidade de forma indireta através das medidas de condutividade elétrica, usando a chamada *Practical Salinity Scale*. A condutividade consiste na quantidade de corrente elétrica capaz de percorrer a água e pode ser mensurada utilizando-se o condutímetro.



Figura 21. Condutivímetro utilizado nos ensaios. Foto da autora.

Segundo Lewis e Perkin (1981), a definição formal para o cálculo da salinidade a partir do valor da condutividade quantificados em laboratório utiliza a seguinte fórmula empírica, onde os valores de salinidade prática são relacionados aos valores da razão K_{15} :

$$S=0,0080-0,1692(K_{15})^{1/2}+25,3851(K_{15})+14,0941(K_{15})^{3/2}-7,0261(K_{15})^2+2,7081(K_{15})^{5/2} \quad (10)$$

Lewis e Perkin (*op. cit.*) afirmam que a variável S corresponde à salinidade prática, fator adimensional, que equivale numericamente à concentração em partes por mil. Segundo ele, a razão K_{15} é dada pela relação entre a condutividade da amostra de água do mar dividida pela condutividade da solução padrão de KCL (fração em massa igual a $32,4356 \times 10^{-3}$), ambas medidas a 15°C e à pressão atmosférica. Quando a salinidade da água do mar é igual a 35, $K_{15} = 1$. Quando a temperatura é diferente de 15°C , a razão K_{15} na equação é substituída na equação por R_t , que é a razão entre a condutividade da amostra de água do mar e a condutividade de a solução padrão de KCl na mesma temperatura. Devido à pequena diferença entre R_t e K_{15} , é acrescentada à equação uma correção ΔS . Assim obtém-se a seguinte fórmula, onde t é a temperatura em que foi medida a condutividade e $k = 0.0162$:

$$S=0,0080-0,1692(R_t)^{1/2}+25,3851(R_t)+14,0941(R_t)^{3/2}-7,0261(R_t)^2+2,7081(R_t)^{5/2}+\Delta S \quad (11)$$

$$\Delta S=(t-15)/[1+k(t-15)] \times [0,0005-0,0056(R_t)^{1/2}-0,0066(R_t)-0,0375(R_t)^{3/2}+0,0636(R_t)^2-0,0144(R_t)^{5/2}]$$

(12)

Para o cálculo da razão de condutividade R_c , a condutividade da água do mar foi considerada igual a $56.000\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Como a amostra foi utilizada em diversos ensaios anteriores ao presente trabalho, a salinidade original das areias foi alterada. Antes de ser alterada, a salinidade da amostra correspondia a $23,19\text{ g/kg}$ de sal. Para corrigir essas mudanças causadas pelos ensaios onde a areia foi utilizada, a amostra passou pelo processo de lavagem com água destilada diversas vezes, quantificando cuidadosamente a salinidade existente entre as lavagens, até que fosse atingida uma salinidade próxima a original. Seguem os dados de salinidade originais e obtidos após as lavagens:

<u>Valores de Salinidade em g/kg</u>
Após Lavagem A: 69,2
Após Lavagem B: 26,52

Figura 22. Valores de salinidade em g/kg para a amostra de areia após o processo de lavagem com água destilada.

É importante ressaltar que a salinidade das areias do campo de dunas varia frequentemente dependendo de diversos fatores, como a pluviosidade local, localização da duna com relação à linha de costa, influência do spray salino, e influência do lençol freático. Além disso, vale lembrar que a quantidade de sal presente em corpos dunares influencia diretamente em sua capacidade de mobilidade, o que modifica diretamente a possibilidade de ocorrer algum tipo de desastre associado com a migração do campo de dunas, como soterramento de vias e construções, assim como demonstrado por Medeiros, 2015.

Atualmente, não é possível quantificar constantemente as condições de salinidade de uma duna, uma vez que o conteúdo de sal varia não só segundo os fatores citados acima, mas também com relação à posição da areia dentro do corpo da duna. Então, levando em conta o altíssimo grau de variabilidade do conteúdo de sal nesse tipo de corpo sedimentar, foi adotado o valor de salinidade encontrado originalmente no momento de coleta da amostra como medida referência para este estudo ($23,1935\text{ g/kg}$ de sal).

5 DESCRIÇÃO SEDIMENTAR

Para realizar a caracterização da amostra, foram realizados os ensaios de peneiramento e sedimentação em colaboração com o trabalho de Medeiros, 2015. As informações obtidas em associação com Medeiros (*op. cit.*) durante os ensaios com a amostra dos Lençóis Maranhenses descritas por ele em seu trabalho são extensivas ao presente estudo.

Segundo Medeiros (*op. cit.*), "para a determinação da curva granulométrica, fez-se necessária a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação das amostras. O peneiramento é usado para a determinação da granulometria da parcela mais grossa do solo, ou seja, superior a peneira de abertura igual a 0,074mm (n° 200). Esse ensaio determina a porcentagem do material que fica retido em cada peneira do conjunto, de forma decrescente, possibilitando ao mesmo tempo a determinação das parcelas de solo que passam e ficam retidas nas peneiras. Dessa forma é possível representar graficamente, em escala logarítmica, a "porcentagem passante *versus* abertura da peneira". Já o ensaio de sedimentação possibilita a determinação da quantidade de finos em suspensão na solução através das leituras realizadas com um densímetro. Apesar de se dividir em dois estágios (peneiramento grosso e peneiramento fino), para esse trabalho não foi necessária a realização da primeira etapa, já que ambas as amostras possuem sedimentos com o diâmetro menor do que a peneira de abertura igual a 2mm (n° 10)".

Ambos os ensaios de peneiramento e sedimentação foram realizados conforme a norma ABNT (1984a) de descrição dos procedimentos de análise granulométrica. O aparelho dispersor e a proveta graduada utilizados podem ser vistos na figura 23, e o agitador de peneiras, na figura 24.

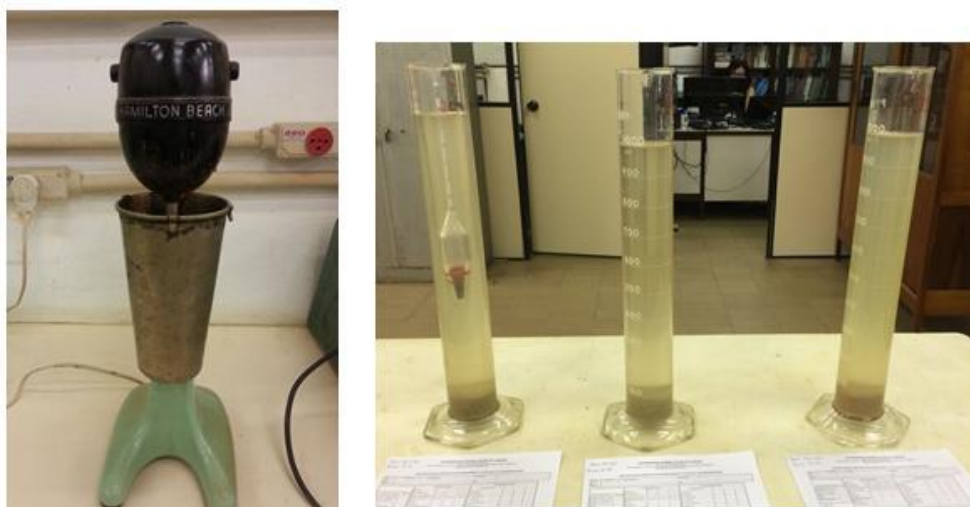


Figura 23. Agitador (esq.) e provetas com o material imediatamente antes de ser agitado manualmente para sedimentação (dir.). Figura retirada de Medeiros, 2015.



Figura 24. Agitador de peneiras. Foto da autora.

Como resultado dos ensaios de peneiramento e sedimentação, gerou-se uma curva granulométrica, onde é possível observar o predomínio da fração areia fina para a amostra de areia em estudo (fig. 25).

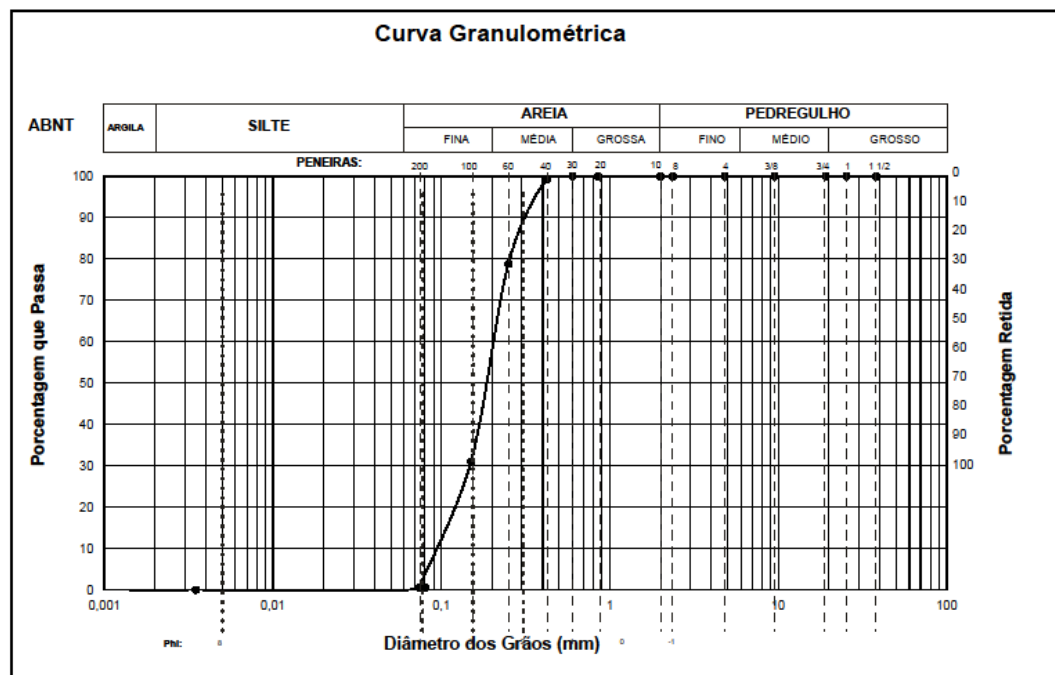


Figura 25. Curva Granulométrica gerada para amostra de areia dos Lençóis Maranhenses. Figura retirada de Medeiros, 2015.

Através da figura 26 é possível notar mais claramente a distribuição das principais frações granulométricas encontradas na amostra do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, extrapolando-as para 100% da composição das areias. Nesse caso, a fração areia fina corresponde à aproximadamente 60% da amostra, ao passo que a fração areia média corresponde aproximadamente aos 40% restantes da amostra.

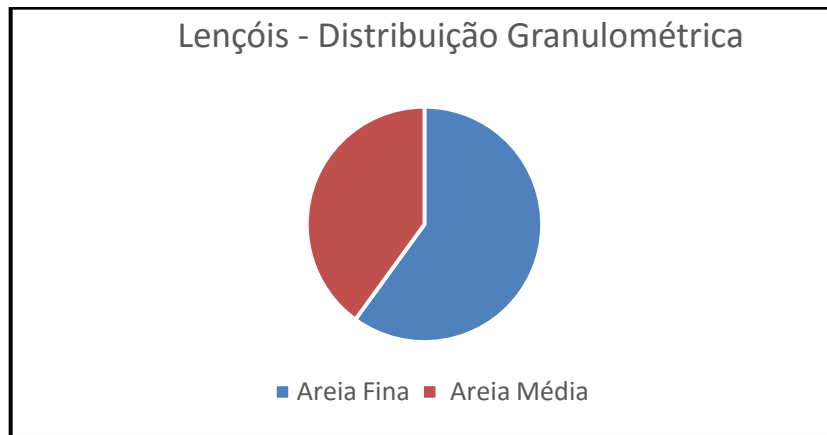


Figura 26. Distribuição granulométrica para amostra de areia dos Lençóis Maranhenses. Figura retirada de Medeiros, 2015.

Com o auxílio do microscópio *Strereomicroscope Stemi 2000-C (ZEISS)/CL 1500 ECO*, cedido pelo Laboratório de Geologia Sedimentar LAGESED, realizou-se uma análise mais completa e detalhada das granulometrias e litologias encontradas na amostra de areia dos Lençóis Maranhenses (fig. 27). Utilizando-se a câmera de resolução de 5MP, foi possível obter imagens representativas da análise realizada.



Figura 27. Microscópio Stereomicroscope Stemi 2000-C (ZEISS)/CL 1500 ECO. Foto da autora.

A fração predominante na amostra de areia corresponde à fração Areia Fina Superior (bimodal, Areia Média Inferior). Os grãos são subarredondados e a amostra encontra-se muito bem selecionada. A areia é composta principalmente por grãos de quartzo (nas variedades hialino, leitoso, rosa e fumê) e carbonato (possivelmente fragmentos de conchas e de espinho de equinóide), além de grãos de turmalina, biotita, epidoto (?) e alguns poucos litoclástos (fig. 28).

A bimodalidade observada na amostra do PNLM é condizente com o que é esperado para amostras de regiões onde o transporte sedimentar eólico é predominante. A granulometria bimodal é causada pela variação na força do vento. Sendo assim, ventos mais fortes transportam os grãos maiores, ao passo que ventos mais fracos transportam os grãos menores.

A fração Areia Média da amostra compreende a fração de maior proporção de carbonatos em relação aos demais minerais, ficando em torno de 30%. Já a fração Silte e Argila apresenta a maior concentração de turmalina e biotita, em torno de 15-20%. A presença de grãos muito bem arredondados coincidente com grãos subarredondados dentro de uma mesma fração granulométrica (no caso, areia fina e muito fina), o que é um indicador

de aporte sedimentar em diferentes épocas. Isso se explica pelo fato de que alguns grãos já sofreram transporte e abrasão por mais tempo que outros, dando origem a essa diferença no grau de arredondamento.

Foi observado que os grãos das frações granulométricas mais finas, como a areia muito fina, são sempre menos arredondados quando comparados a granulometrias mais grossas. Isso acontece devido a maior superfície de contato e arestas maiores em granulometrias grossas, o que torna essas frações mais suscetíveis à abrasão e ao desgaste e, conseqüentemente, mais fáceis de serem arredondadas pelo transporte.

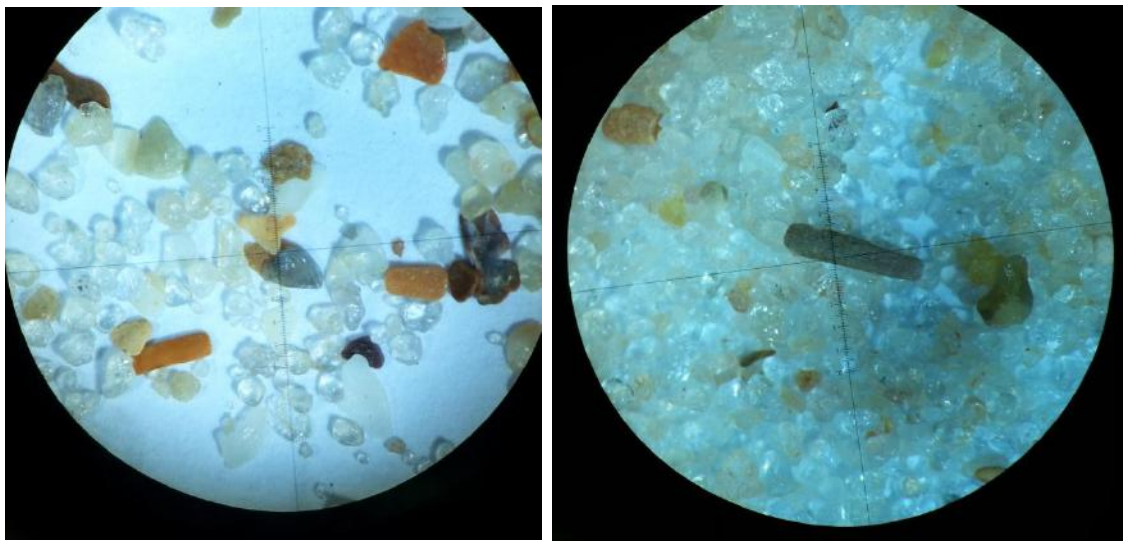


Figura 28. Litoclásticos e fragmentos de conchas – 2.0 x aumento (esq.) e espinho de equinóide – 3.8 x aumento (dir.). Imagens vistas a partir do nicol do microscópio *Stereomicroscope Stemi 2000-C* (ZEISS)/CL 1500 ECO. Fotos da autora.

De acordo com os ensaios realizados por Medeiros (2015) no mesmo material utilizado na presente análise, o valor de densidade dos grãos calculado para as areias do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses conforme a norma ABNT (1984b) é de 2,64. É coerente afirmar que esse valor seja próximo ao esperado, uma vez que o material analisado é composto em sua maior parte por grãos de quartzo, e que a densidade específica estabelecida para o quartzo na literatura é de 2,65.

6 ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS DE DIREÇÃO E INTENSIDADE DO VENTO

Com o intuito de gerar dados de velocidade e direção do vento precisos e confiáveis para reprodução em escala reduzida no túnel de vento, foram estudados os dados meteorológicos do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Tais dados são coletados pela Estação Meteorológica A218 Farol Preguiças (Código OMM 81717; altitude 5 metros), que está localizada no município mais próximo do PNLN, chamado Barreirinhas. A estação meteorológica se encontra no Farol Preguiças, de coordenadas 2.592352° S, 42.707529° W. O ideal foi utilizar todos os dados disponíveis desde a inauguração dessa estação meteorológica. Os dados meteorológicos de todas as estações meteorológicas do Brasil, assim como os da Estação Farol Preguiças, são disponibilizados ao público pelo INMET através do site www.inmet.gov.br/portal/.

O INMET é o Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil, órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Segundo informado pelo próprio site do INMET, "A missão do INMET é prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo ainda para o desenvolvimento sustentável do País. [...] O INMET representa o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM) e, por delegação desta Organização, é responsável pelo tráfego das mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul e os demais centros meteorológicos que compõem o Sistema de Vigilância Meteorológica Mundial." Acessado em: 12 out. 2015.

6.1 Aquisição dos dados

Os dados completos da Estação Farol Preguiças foram solicitados ao INMET no dia 09 de Agosto de 2015, através do site referido acima, na aba "Fale Conosco/ Solicitação de dados de estações automáticas". O arquivo solicitado foi recebido via email pela autora do presente estudo no dia 20 de Agosto de 2015, em formato xls compactado, tamanho 1,5MB.

O arquivo xls oferecido pelo INMET possui dados desde a inauguração da Estação Farol Preguiças, dia 22 de novembro de 2008, até o dia 30 de junho de 2015. Foram fornecidas informações de velocidade do vento, direção do vento, radiação global, precipitação, rajada de vento máxima e pressão atmosférica máxima e mínima; todas coletadas a cada hora dos dias do período informado, completando uma tabela. Para o presente trabalho, foram selecionados somente os dados de velocidade e direção do vento.

6.2 Processamento dos dados

6.2.1 Programação do Software Microsoft Excel 2010

Uma das principais dificuldades na etapa de processamento dos dados foi a organização dos mesmos para poderem ser inseridos e reconhecidos pelo *Software WRPLOT View Freeware 7.0.0*.

Foram contabilizados 57.880 dados, tanto de velocidade, quanto de direção do vento, incluindo as medições a cada hora de 2411 dias. Devido a grande densidade de informação, foi necessária a utilização de uma ferramenta de programação chamada MACRO VBA, pertencente ao pacote Microsoft Office, para auxiliar na organização desses dados. Essa ferramenta consiste na aplicação de rotinas (scripts) que podem programar o *software* para realizar diversas tarefas de maneira automática. Nesse trabalho, o VBA foi utilizado para reorganizar as linhas e colunas das planilhas que foram fornecidas pelo INMET.

Segue abaixo nas figuras 29 e 30, o MACRO VBA utilizado:

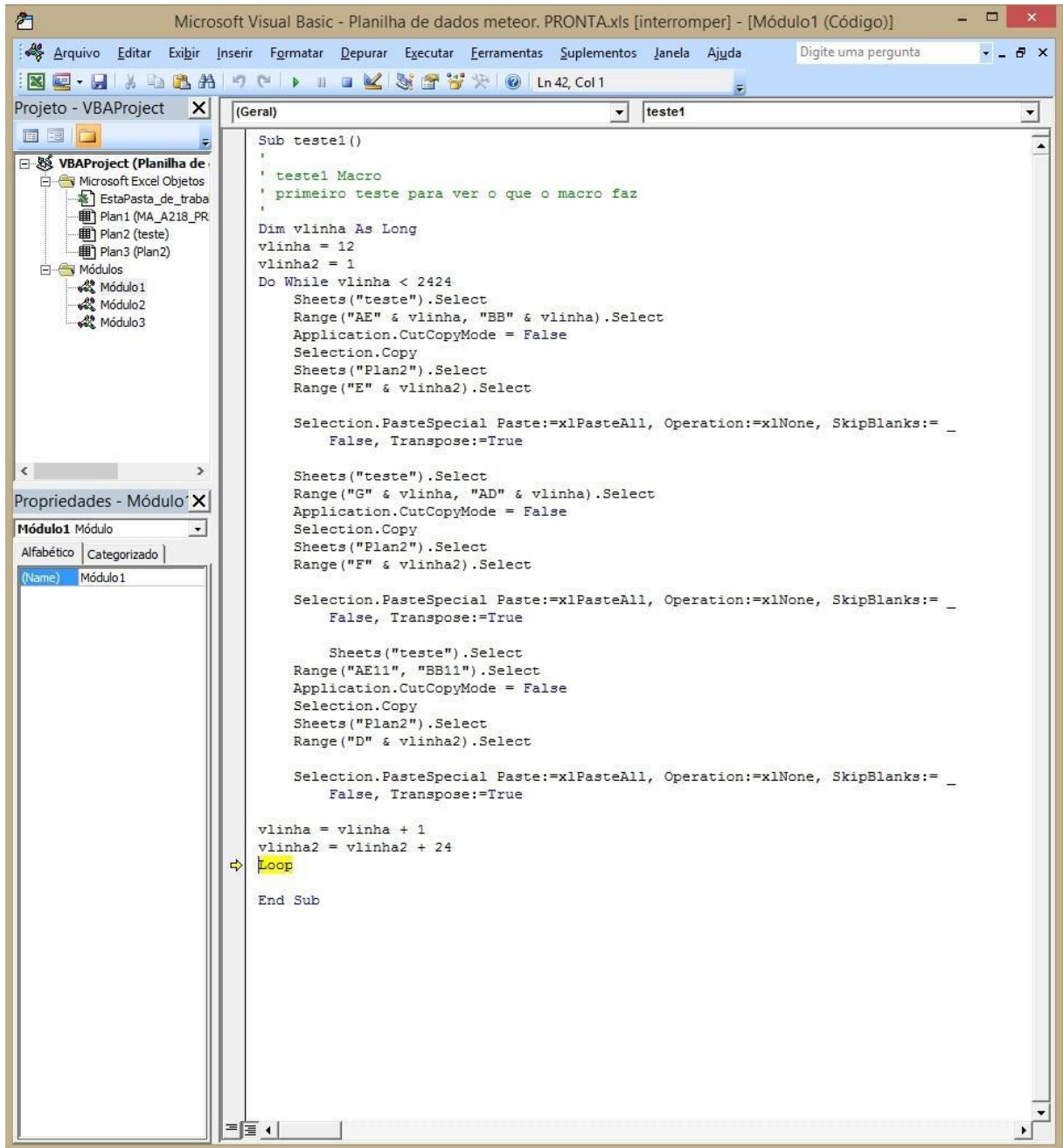


Figura 29. Rotina (script) do MACRO VBA utilizado no presente trabalho, parte I.

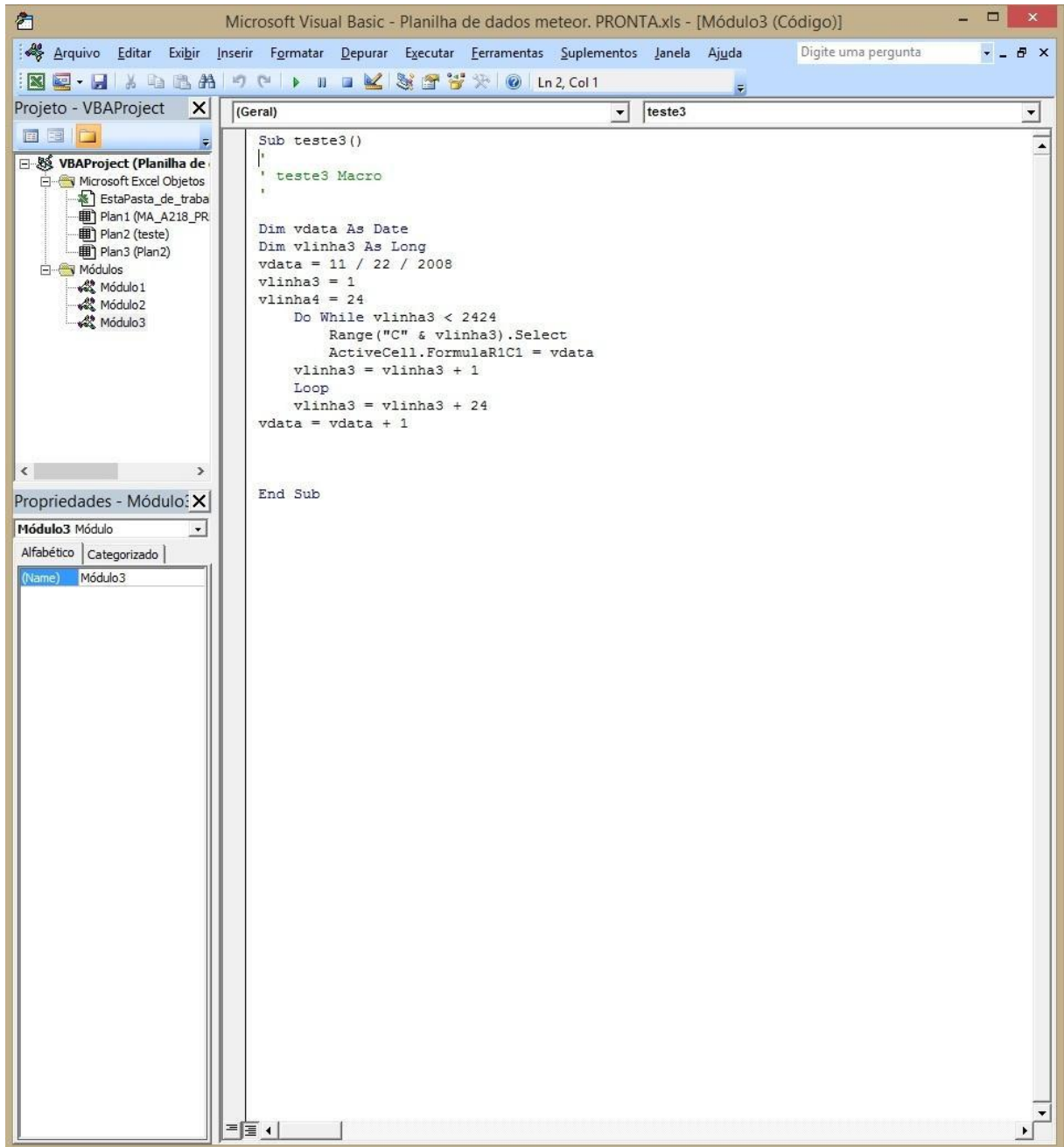


Figura 30. Rotina (script) do MACRO VBA utilizado no presente trabalho, parte II.

6.2.2 Produção da rosa dos ventos

A rosa dos ventos corresponde a um diagrama que mostra, para dado local, a frequência e a força dos ventos originados de várias direções. Através da construção de rosas dos ventos para a Estação A218 Farol Preguiças, foi possível interpretar de forma clara os dados de velocidade e direção dos ventos oferecidos pelo INMET, correspondentes ao município de Barreirinhas - MA. A cidade de Barreirinhas encontra-se muito próxima ao Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, assim foi possível extrapolar as informações adquiridas para o campo de dunas estudado.

Para gerar as rosas dos ventos foi necessário escolher um *software* específico para essa tarefa, que fosse oferecido gratuitamente aos usuários e que reconhecesse os dados em formato xls. O *software* adotado corresponde ao programa WRPLOT View Freeware 7.0.0, oferecido e disponível para download gratuito através do site www.weblakes.com/index.html.

6.2.3 Aplicação dos dados em software WRPLOT View 7.0.0

O programa WRPLOT View 7.0.0 permite que seu usuário carregue arquivos xls e informe quais seguimentos dessa tabela xls são correspondentes aos dados utilizados pela rosa dos ventos. Os dados informados ao *software* pelo presente trabalho correspondem ao dia, mês, ano, hora, velocidade e direção do vento de cada leitura da Estação A218 Farol Preguiças (fig. 31). Como dito anteriormente, foram processados 57.880 dados de cada uma das informações registradas no WRPLOT View. O *software* também permite cadastrar informações da estação meteorológica coletora dos dados, como latitude, longitude e altitude da estação.

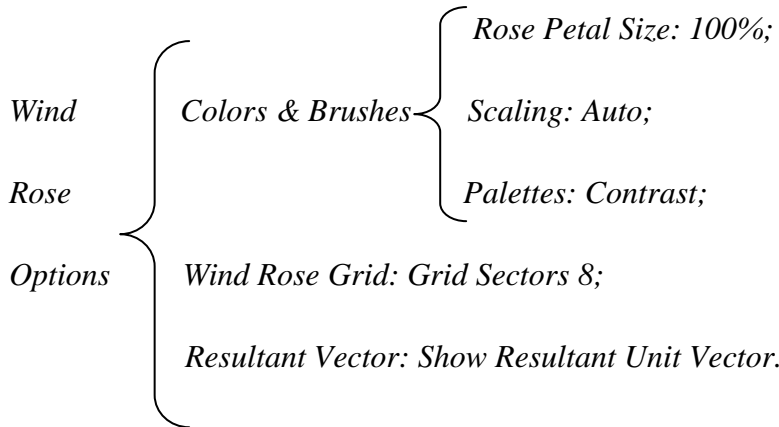
Após carregar o arquivo xls, o programa salva esses dados informados em formato sam. O usuário volta a página de início do WRPLOT View e abre o arquivo sam produzido anteriormente (fig. 32). O programa então fornece ao usuário a rosa dos ventos, um gráfico de classificação dos ventos por distribuição de frequência, um relatório de distribuição de frequência e um demonstrativo do intervalo de tempo contabilizado.

Além disso, é possível configurar no *software* características específicas para a geração da rosa dos ventos, como os intervalos de classe dos ventos, unidades, escalas, cores e vetores de direção dos ventos.

Para o presente estudo, foram adotadas as seguintes configurações no WRPLOT View:

Display {

- Wind Directions: 36;
- Wind Classes: 9;
- Class Range: 1,5-2,0 m/s; 2,0-2,5 m/s; 2,5-3,0 m/s; 3,0-3,5 m/s;
3,5-4,0 m/s; 4,5-5,0 m/s; 5,0-5,5 m/s; > 5,5 m/s;
- Units: m/s;
- Orientation: direction (blowing from).



Import Surface Data from Excel

Import Surface Data From (Excel File): C:\..\Dados Meteorologicos\Dados Met. Resultados\Rosas Oficiais\Planilha CERTA de dados meteor. FUNCIONA.xls

Save Surface File As (SAMSON Format): C:\..\Dados Meteorologicos\Dados Met. Resultados\Rosas Oficiais\Planilha CERTA de dados meteor. FUNCIONA.sam

#	Data Field Name	Excel Column Name	Missing Indicator in Excel File	Unit in Excel File	Number Type
3	Day	A		N/A	1 to 31
4	Hour	I		01 to 24	00 to 23, 01 to 24
5	Wind Direction	F		degrees	Integer
6	Wind Speed	G		m/s	Decimal

First Row to Import: 1 Set Last Row to Import: 57888 Set

Excel File	SAMSON File	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
67	24	11	2008		39777	1800	342	5,80	39777	18										
68	24	11	2008		39777	1900	343	5,40	39777	19										
69	24	11	2008		39777	2000	342	5	39777	20										
70	24	11	2008		39777	2100	342	4,80	39777	21										
71	24	11	2008		39777	2200	339	4,10	39777	22										
72	24	11	2008		39777	2300	340	4,70	39777	23										
73	24	11	2008		39777	0	339	4	39777	0										
74	25	11	2008		39777	100	340	3,70	39777	1										
75	25	11	2008		39777	200	342	5,30	39777	2										
76	25	11	2008		39777	300	341	4,70	39777	3										
77	25	11	2008		39777	400	339	4,80	39777	4										
78	25	11	2008		39777	500	334	4,30	39777	5										
79	25	11	2008		39777	600	337	5,10	39777	6										
80	25	11	2008		39777	700	335	5,10	39777	7										
81	25	11	2008		39777	800	333	6,50	39777	8										
82	26	11	2008		39777	900	334	6,30	39777	9										

Help Close

Figura 31. Tabela xls aplicada em Software WRPLOT View Freeware 7.0.0

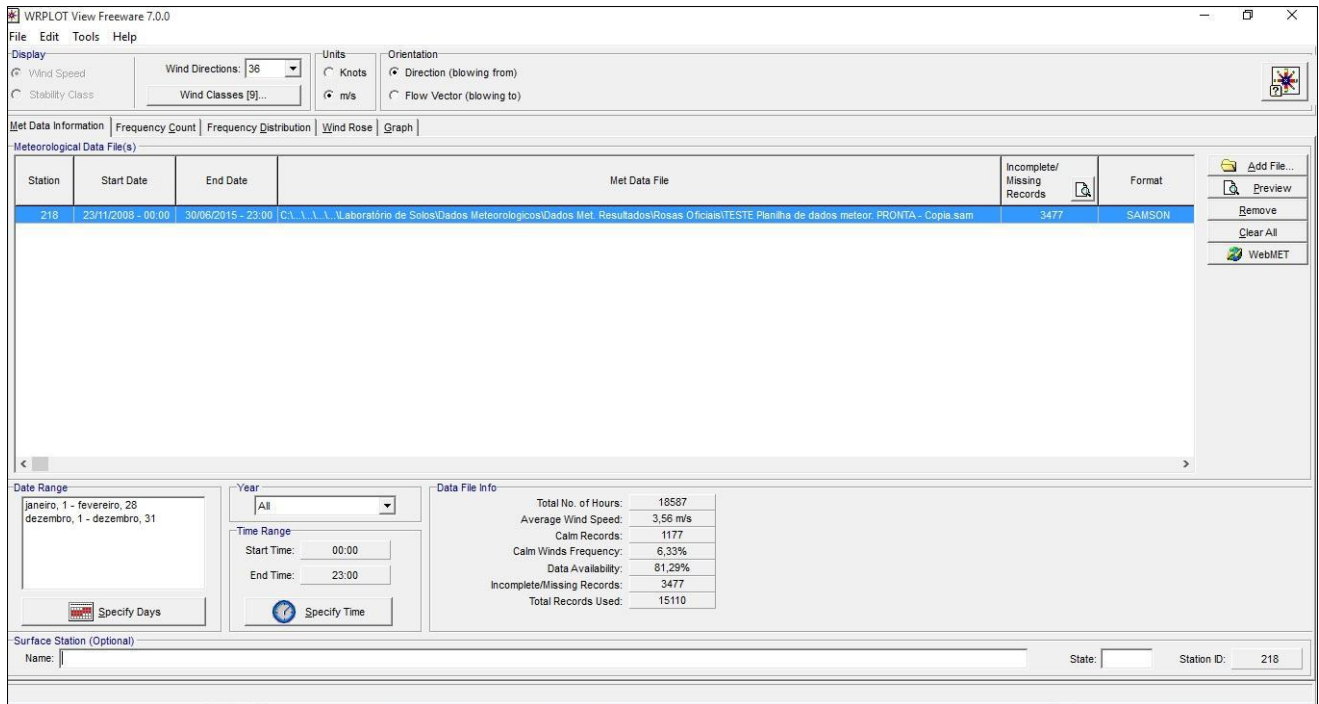


Figura 32. Dados em formato sam carregados em *Software WRPLOT View Freeware 7.0.0*

6.3 Resultados - rosas dos ventos

Como resultado das análises quantitativas e qualitativas dos dados de velocidade e direção dos ventos para a Estação A218 Farol Preguiças, foram geradas quatro rosas dos ventos e seus subprodutos, correspondentes a cada uma das estações do ano na região (fig. 33, 34, 35, 36 e 37). Considerando que cada estação do ano possui características climatológicas e meteorológicas diferentes, a análise dos ventos do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses foi dividida sazonalmente, de forma que o presente estudo ficasse mais completo e detalhado. Foi contabilizado cada estação do ano como a sequência de 3 meses completos à partir de dezembro.

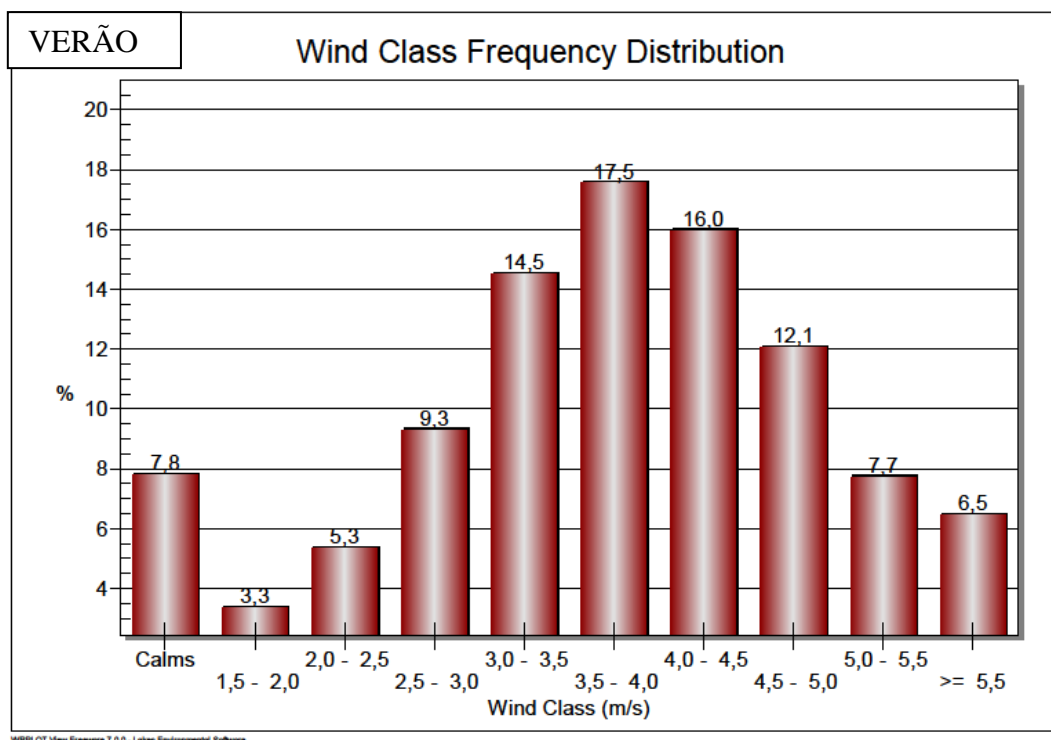


Figura 33. Gráfico correspondente a Rosa 9 Verões. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).

Através da figura 33 podemos observar que, durante o verão, 17,5% dos ventos que atingem a Estação A218 Farol Preguiças têm velocidades entre 3,5 e 4,0 m/s. Estas são as velocidades predominantes no PNLM nesta estação do ano. Através da figura 34 a seguir, podemos observar estes mesmos dados de velocidade de forma diferente, através das pás da rosa dos ventos, indicados por cores. A figura 34 também indica a direção predominante durante o verão na região através do Vetor Resultante, que demonstra que 94% dos ventos vêm da direção 332°NW.

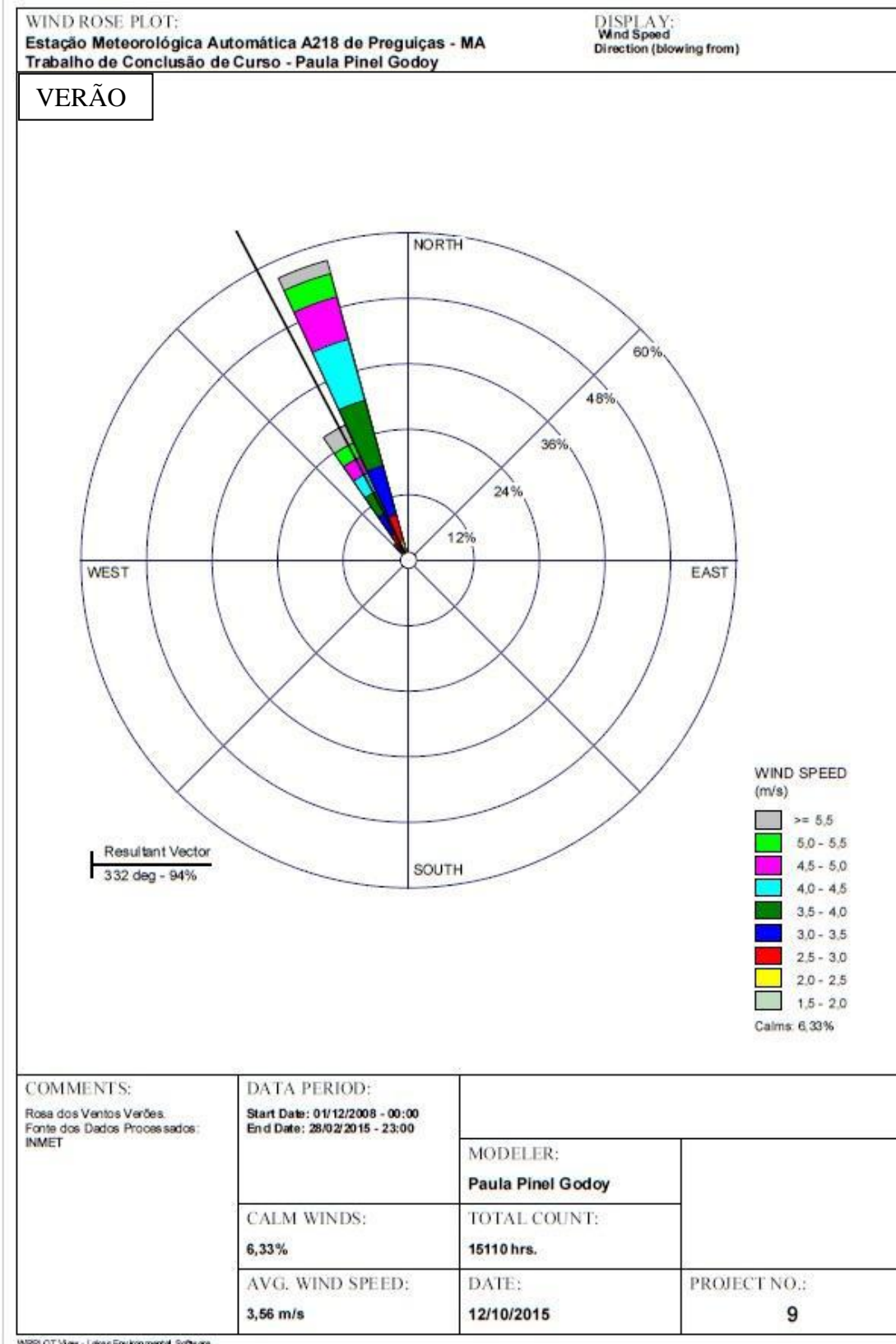


Figura 34. Rosa dos ventos Rosa 9 Verões. Período de tempo contabilizado de 01/12/2008 a 28/02/2015. Estação do ano: verão; total de horas contabilizadas: 15110. WRPLOT View - Lakes Environmental Software.

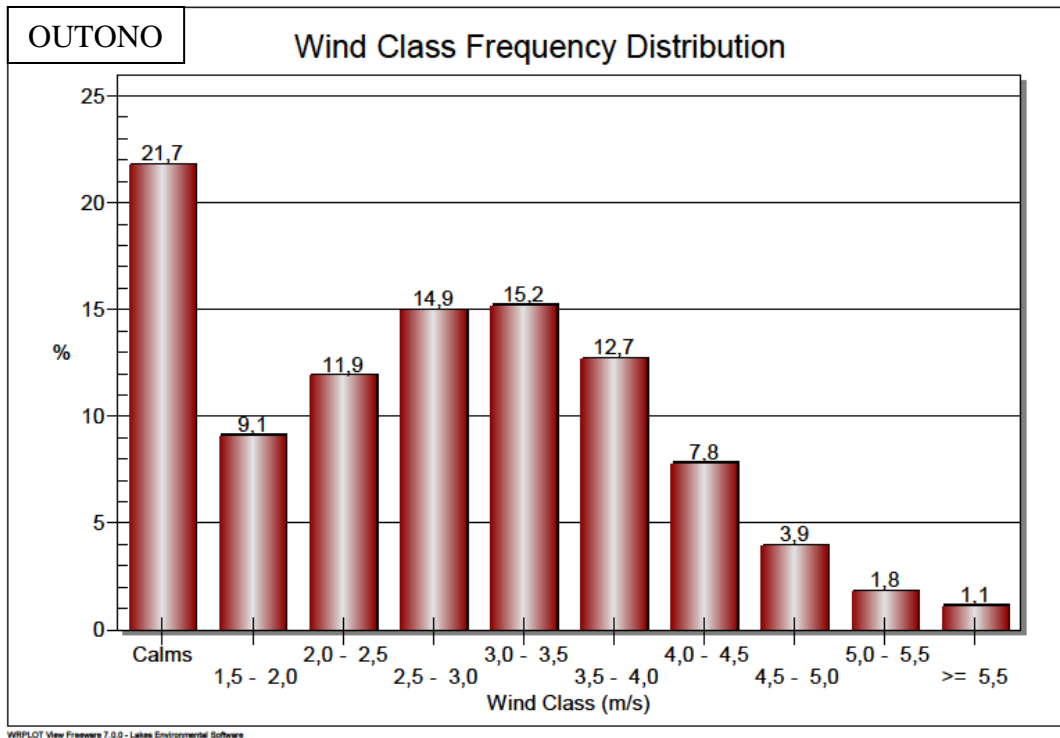


Figura 35. Gráfico correspondente a Rosa 10 Outonos. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).

Através da figura 35 podemos observar que, durante o outono, 21,7% dos ventos que atingem a Estação A218 Farol Preguiças têm velocidades menores que 1,5 m/s. Estas velocidades são predominantes no PNLN nesta estação do ano. Através da figura 36 a seguir, podemos observar estes mesmos dados. A figura 36 também indica a direção predominante durante o outono na região através do Vetor Resultante, que demonstra que 83% dos ventos vêm da direção 323°NW.

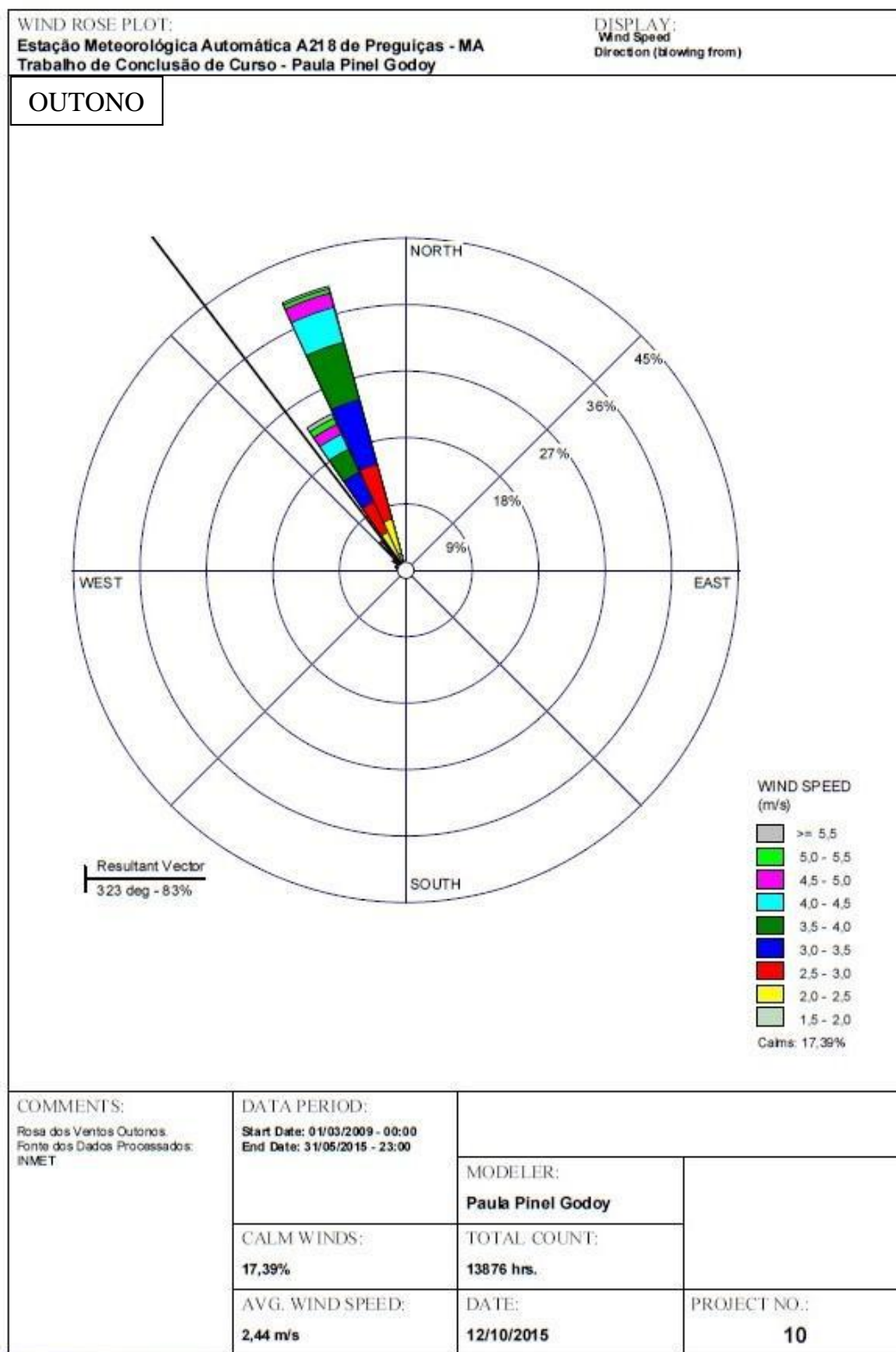


Figura 36. Rosa dos ventos Rosa 10 Outono. Período de tempo contabilizado de 01/03/2008 a 31/06/2015.

Estação do ano: outono; total de horas contabilizadas: 13876. WRPLOT View - Lakes Environmental Software.

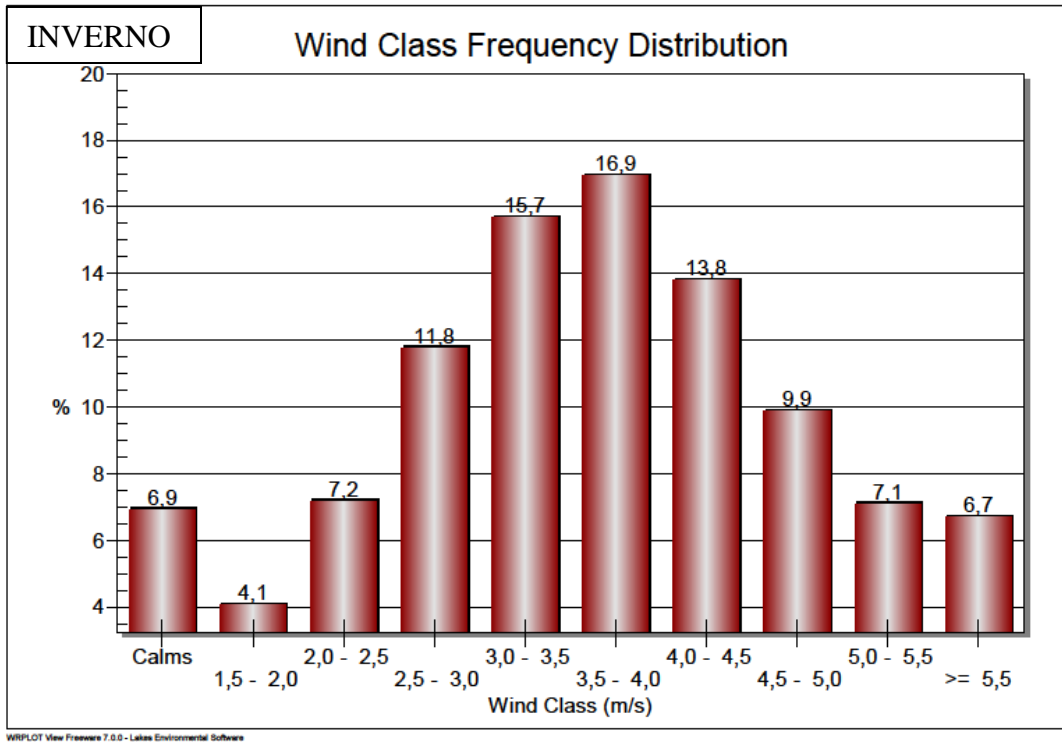


Figura 37. Gráfico correspondente a Rosa 11 Invernos. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).

Na figura 37 podemos notar que, durante o inverno, 16,9% dos ventos que atingem a Estação A218 Farol Preguiças têm velocidades entre 3,5 e 4,0 m/s. Estas velocidades são predominantes no PNLM nesta estação do ano. Através da figura 38 a seguir, podemos observar estes mesmos dados e também a direção predominante dos ventos durante o inverno na região através do Vetor Resultante, que demonstra que 94% dos ventos vêm da direção 329°NW.

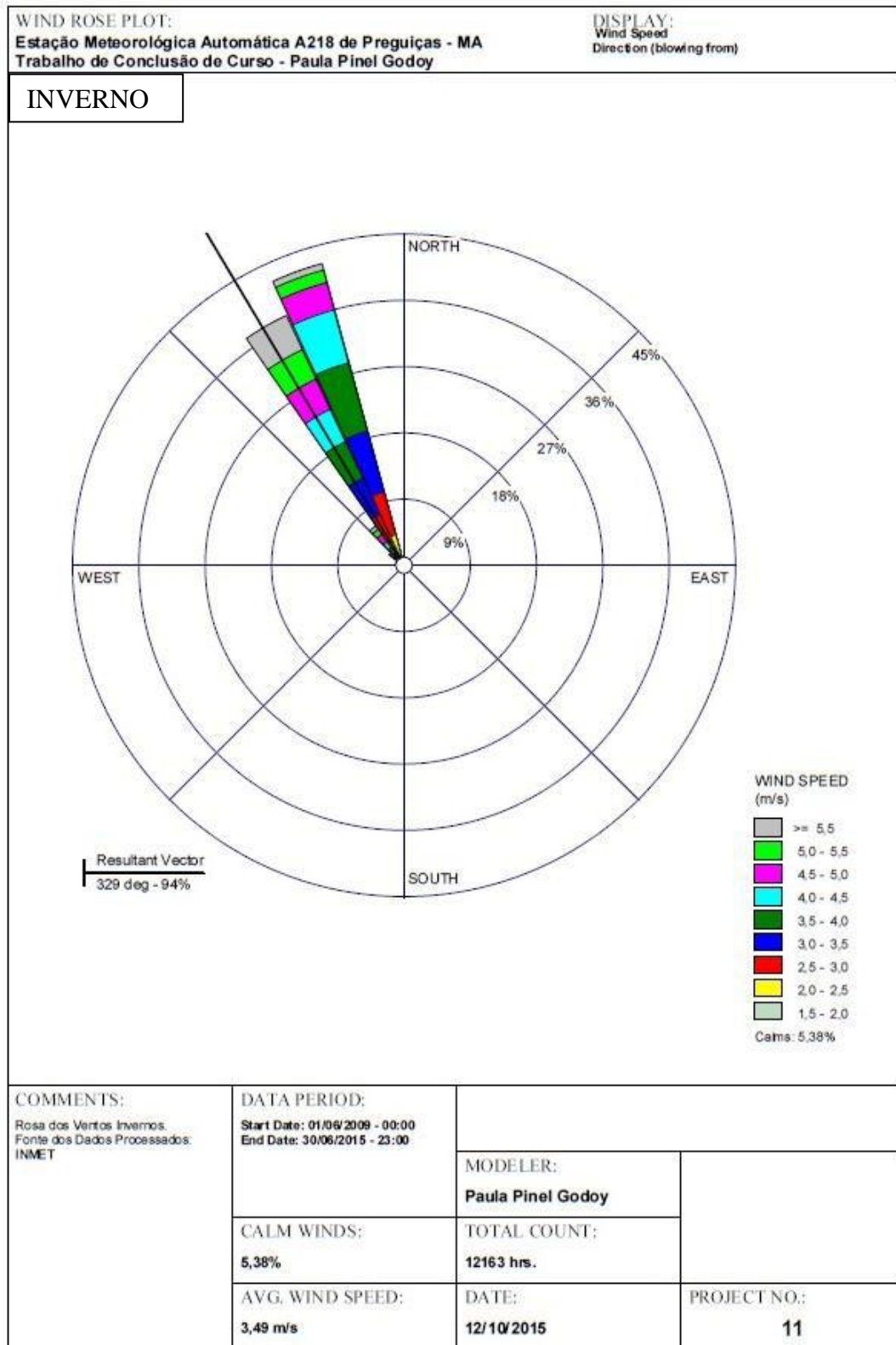


Figura 38. Rosa dos ventos Rosa 11 Invernos. Período de tempo contabilizado de 01/08/2008 a 30/08/2015. Estação do ano: inverno; total de horas contabilizadas: 12163. WRPLOT View - Lakes Environmental Software.

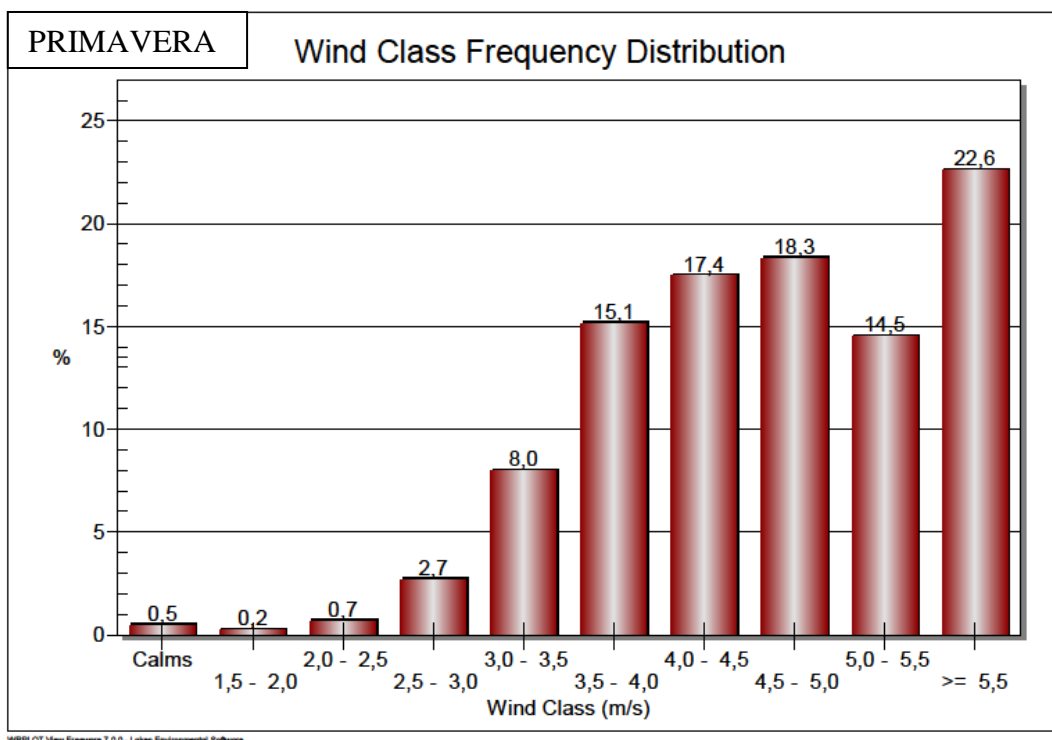


Figura 39. Gráfico correspondente a Rosa 12 Primaveras. Distribuição de Frequência com relação às classes de vento em (m/s).

A figura 39 mostra que, durante a primavera, 22,6% dos ventos que atingem a Estação A218 Farol Preguiças têm velocidades maiores que 5,5 m/s. Estas velocidades são predominantes no PNLM nesta estação do ano. A figura 40 abaixo informa estes mesmos dados e também indica a direção predominante dos ventos durante a primavera na região através do Vetor Resultante, que demonstra que 99% dos ventos vêm da direção 335°NW.

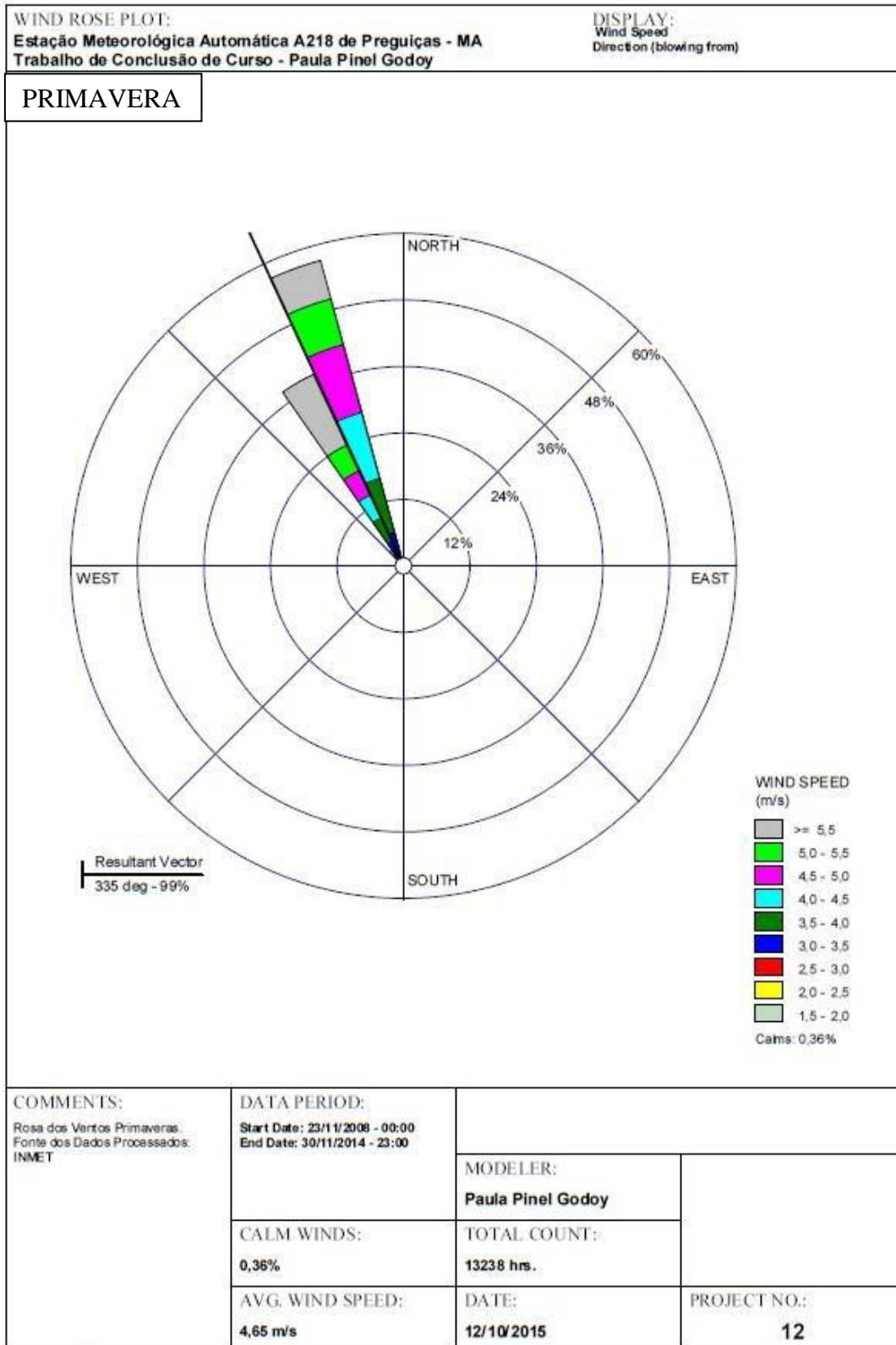


Figura 40. Rosa dos ventos Rosa 12 Primaveras. Período de tempo contabilizado de 28/11/2008 a 30/11/2015. Estação do ano: primavera; total de horas contabilizadas: 13238. WRPLOT View - Lakes Environmental Software.

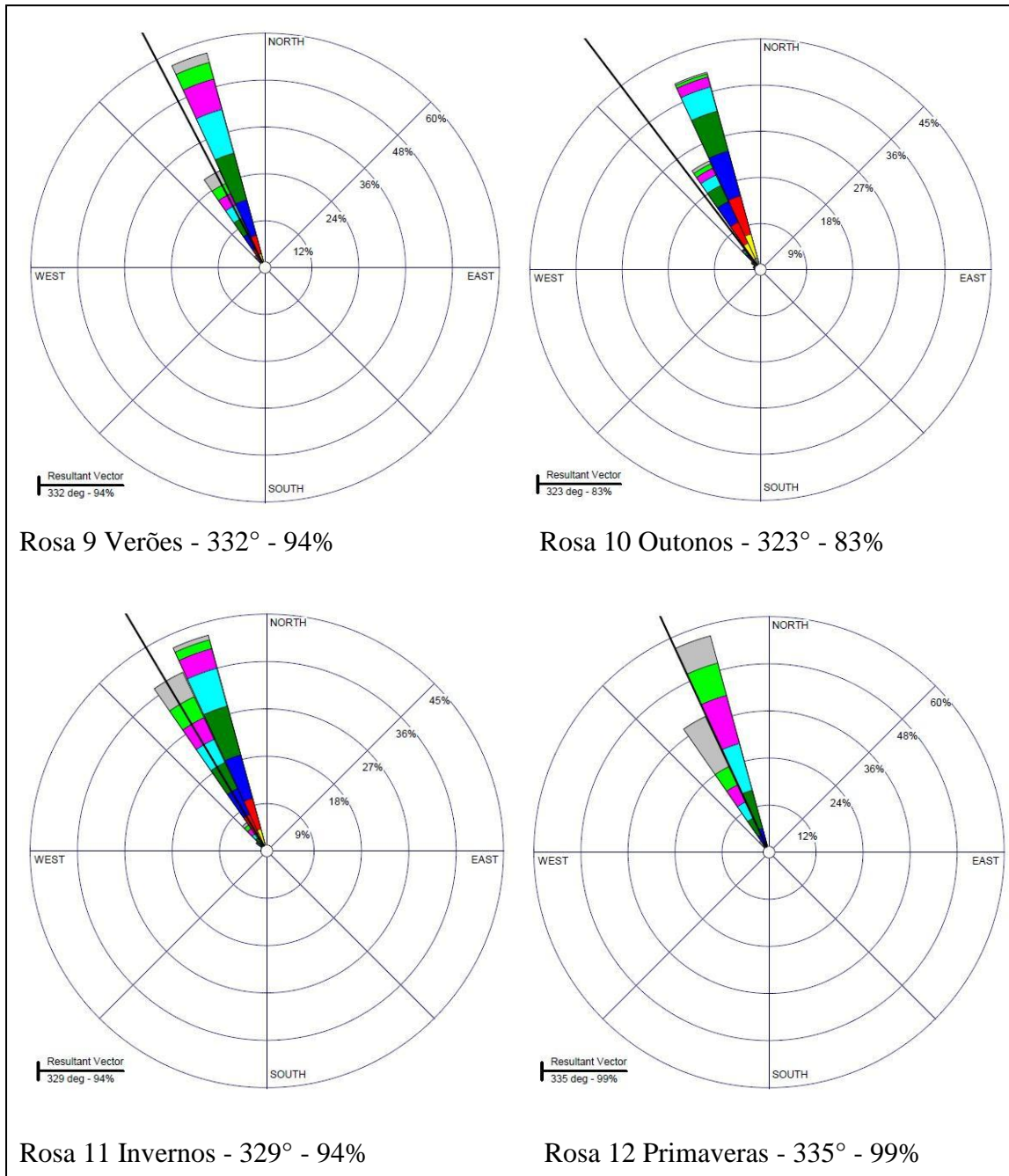


Figura 41. Quadro geral comparativo das rosas dos ventos das quatro estações do ano. É possível notar através da imagem e do texto as mudanças nas direções e velocidades dos ventos de estação para estação do ano.

O *software* WRPLOT View 7.0.0 possui o recurso de exportar a rosa dos ventos produzida diretamente para o *Google Earth* através das coordenadas da estação meteorológica fornecidas pelo usuário. Esse recurso permite uma visualização completa e interativa da distribuição das direções de vento coletadas, além das respectivas velocidades representadas por cores equivalentes às das rosas dos ventos produzidas (fig. 42, 43, 44 e 45).

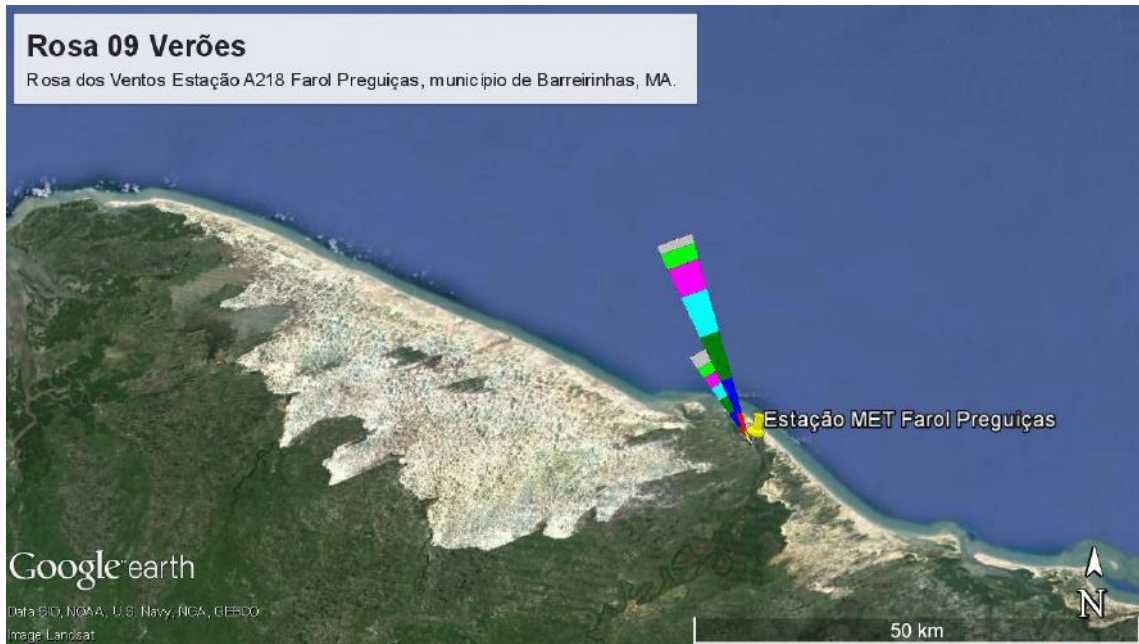


Figura 42. Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Verão plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).



Figura 43. Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Outono plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).

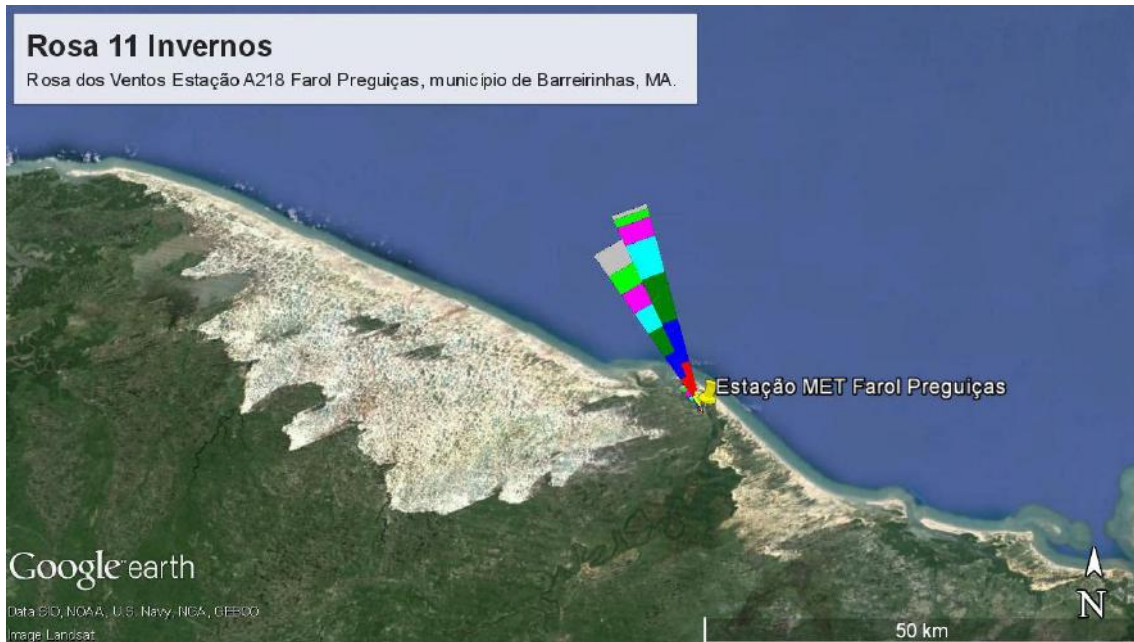


Figura 44. Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Inverno plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).

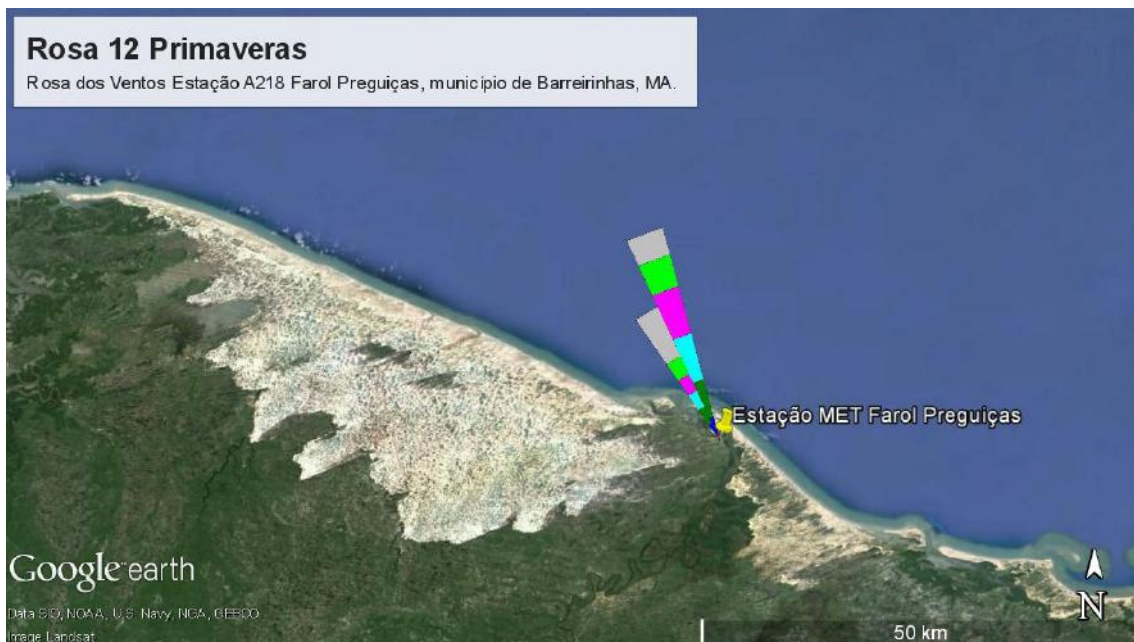


Figura 45. Rosa dos ventos correspondente a estação do ano Primavera plotada sobre imagem Landsat do Google Earth (12/10/2015).

6.3.1 Interpretação dos Dados Meteorológicos

Assim como visto anteriormente na literatura, os grãos de areia necessitam que o vento que incide sobre eles tenha no mínimo uma velocidade próxima a 5 m/s para se locomover.

Além disso, conforme Summerfield (1991) e Bierman e Montgomery (2015) afirmam, as rajadas de vento são fatores desencadeadores essenciais para a construção de dunas barcanas.

Conforme o estudo aqui apresentado, dentre as estações do ano, a Primavera é a que possui maior velocidade média do vento, correspondente a 4,65 m/s. Durante a Primavera ocorre também a maior incidência de rajadas de vento acima de 5,0 m/s. Portanto, conforme a teoria acima, as dunas barcanas deveriam desenvolver-se principalmente durante a Primavera. Contudo, os dados de campo presentes na literatura mostram que as dunas desenvolvem-se melhor durante Inverno.

As diferenças nos teores de umidade do ar e pluviosidade entre as estações do ano são as prováveis justificativas para o grande transporte eólico que ocorre ao longo do Inverno. É sabido que a coesão conferida aos grãos de areia pela sucção osmótica e o conteúdo de sais interfere significativamente na migração das dunas, assim como discutido por Medeiros (2015), Garcia (2015) e Gonçalves *et al.* (2003). Aparentemente essa coesão dos sedimentos é mais influente no transporte dos mesmos do que as rajadas de vento naturais.

7 DESCRIÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O modelo físico em escala reduzida utilizado no presente estudo consiste na tentativa de construção de uma duna barcana em túnel de vento. Túneis de vento podem ser definidos como estruturas ou câmaras tubulares, onde é possível imprimir um fluxo constante de ar com velocidade controlada sobre um modelo em escala reduzida de determinado objeto. Alguns túneis são equipados com equipamentos de medições onde os mais diversos parâmetros podem ser isolados e estudados separadamente, auxiliando ativamente na compreensão de sistemas complexos como o campo de dunas em questão.

Túneis de vento podem ser classificados conforme o valor da velocidade do vento dentro do tubo, valores internos de temperatura do ar e conforme o caminho percorrido pelo ar dentro da câmara. Túneis subsônicos são os que imprimem uma velocidade no ar inferior à velocidade do som, ao passo que supersônicos são os túneis de velocidade superior à velocidade do som. Existem também túneis hipersônicos, onde o número de Mach atinge valores maiores ou iguais a cinco, calculado com a velocidade do escoamento na seção de testes (Buscariolo, 2009). Para os parâmetros de estrutura do tubo, Buscariolo (*op. cit.*) apud Hucho 1998 especifica que existem os túneis de circuito aberto, chamados túneis tipo Eiffel, onde o ar é retirado e devolvido ao meio externo; e os túneis de circuito fechado, ou tipo Göttingen, onde o ventilador recircula o ar dentro da câmara, não havendo entrada de ar do ambiente exterior ao circuito.

Conforme as classificações citadas anteriormente, o túnel de vento usado nos ensaios pode ser caracterizado como um túnel subsônico de pequenas dimensões do tipo Eiffel. Suas dimensões, como pode ser observado na figura 46, correspondem à 200 centímetros de comprimento, por 62 centímetros de largura e 62 centímetros de altura, sendo que sua extensão é dividida em três seções iguais de 66,5 centímetros de comprimento cada. Este túnel encontra-se no Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental do Departamento de Geologia na UFRJ e foi construído por García (2015).

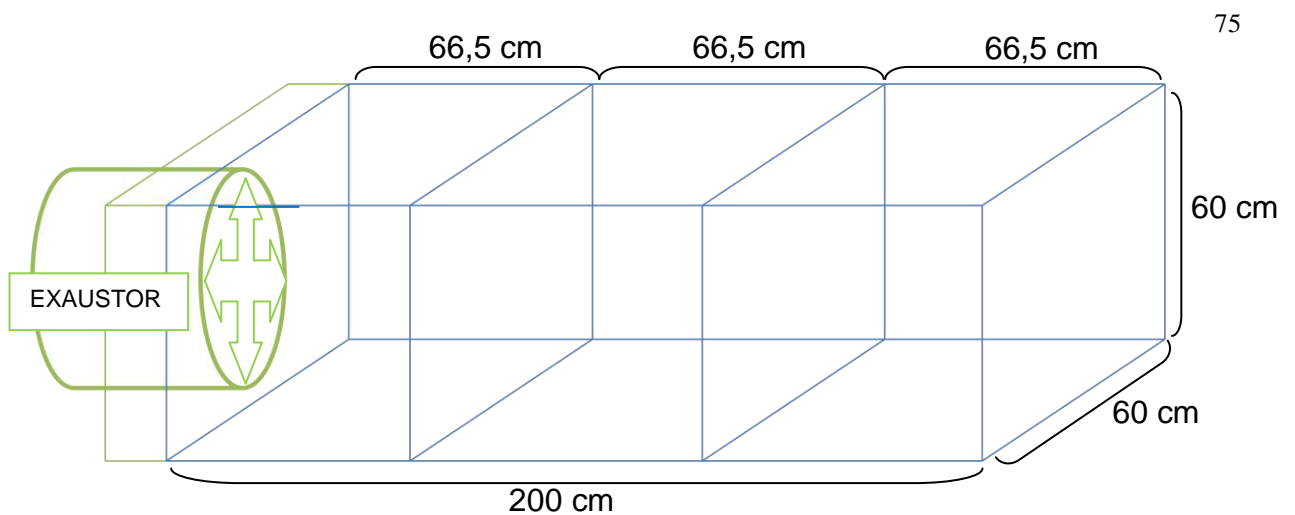


Figura 46. Desenho esquemático do túnel de vento utilizado durante os ensaios e suas principais medidas.

O exaustor acoplado ao túnel é do tipo axial com 50 cm de diâmetro e 6 pás móveis, que gera um fluxo de ar estável para os parâmetros considerados nos ensaios. Suas especificações são: modelo E50T4P; 220/380 V; marca Ventisilva; ventilador industrial. Segundo Garcia (*op. cit.*), o exaustor succiona o ar de dentro do túnel, deslocando o material através de uma superfície rugosa, que corresponde as lixas aderidas ao fundo do túnel de vento. Os valores de velocidade do ar e temperatura do ambiente durante os ensaios foram aferidos com o auxílio de um anemômetro de mão (fig. 47).



Figura 47. Anemômetro usado para medir as velocidades e temperaturas dentro do túnel de vento durante os ensaios. Foto da autora.

Segundo Bagnold (1941), túneis de sucção possuem diversas vantagens para este tipo de ensaio com areia em circuito aberto. Ele afirma que o ar que entra na seção de ensaio não é perturbado pelo exaustor, então não há necessidade de telas retificadoras do vento. Além disso, o autor afirma que existe uma grande vantagem prática causada pela pressão negativa dentro do túnel. Ela seria responsável por manter todas as portas móveis e fitas vedadoras pressionadas em suas posições, ajudando a prevenir escapes de ar não desejados.

8 ESTUDO AERODINÂMICO PRELIMINAR

Neste modelo físico em escala, o principal fator determinante na evolução do sistema dunar reproduzido é o vento gerado dentro da seção de testes do túnel de vento e suas características como fluido. Por essa razão, foi necessário caracterizar as condições do campo de ventos em termos físicos e matemáticos. Em termos matemáticos, como foi visto a partir do Número de Reynolds, equações específicas para este tipo de fluxo foram previamente definidas por estudiosos e, então, aplicadas a este trabalho. Em termos físicos, a melhor forma de analisar as condições do fluxo é visualizar esse fluido, assim como descrito abaixo.

Com o intuito de definir a melhor região para a execução dos ensaios, realizou-se um mapeamento dos perfis de turbulência encontrados ao longo da câmara de testes do túnel. Para isso, desenvolveu-se ao longo do estudo um método de visualização do escoamento de ar que possibilitasse a identificação da zona de maior estabilidade e, conseqüentemente, mais adequada para a realização do trabalho.

Levando em conta a disponibilidade de recursos, o método adotado para visualizar o campo de vento foi a construção de uma moldura de madeira de Cedro de proporções equivalentes a área interna do túnel de vento, onde foi fixada uma grade de ferro já pronta (fig 48). Nesta grade foram amarrados pedaços de fitilho de aproximadamente 25 cm de comprimento, de forma que essas fitas voassem de acordo com o vento que incidisse sobre elas. A função da moldura é dar suporte para a grade de ferro, que por sua vez possibilita a amarração das fitas de fitilho sem influenciar significativamente o fluxo de ar.



Figura 48. Processo de construção das molduras de madeira e amarração da grade de ferro. Fotos da autora.

8.1 O escoamento de ar

Seguindo essa metodologia de grade com fitilhos, foram realizados testes preliminares com o intuito de verificar o escoamento e o comportamento dos elementos dentro da câmara de trabalho.

Durante os testes, a grade com fitilhos foi colocada em diversas posições ao longo da câmara do túnel de vento (fig. 49). Foi possível notar nitidamente a regularidade ou irregularidade do fluxo de ar nos trechos da seção do túnel. Nas partes superior e inferior dessa seção, o vento possui menor linearidade se comparado ao centro, sendo que a parte superior apresenta menor qualidade de fluxo do que a parte inferior. Próximo aos cantos, no encontro entre as paredes da seção, foi possível notar que o fluxo de ar possui sentido variável, fazendo com que os fitilhos tomassem diversas vezes sentido contrário ao sentido primordial do vento gerado pelo exaustor (fig. 50).



Figura 49. Teste de visualização do escoamento de ar dentro do túnel de vento usando grade com fitilhos. Foto da autora.

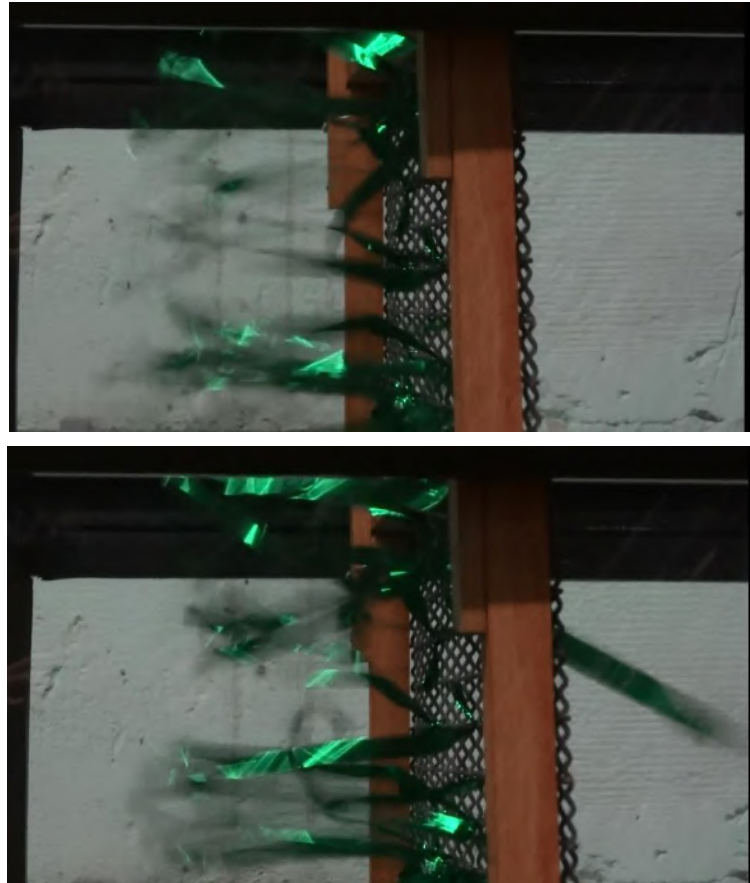


Figura 50. Teste de visualização do escoamento de ar; fitilhos variando de sentido próximo aos cantos da câmara do túnel. Fotos da autora.

A partir das observações feitas acima e dos dados encontrados no trabalho de Garcia (2015), foi possível concluir que a seção de melhor qualidade no fluxo do vento corresponde à área central do túnel, mais precisamente equivalente a um retângulo de dimensões 26,3 cm x 33,8 cm, como pode ser observado na figura 51.

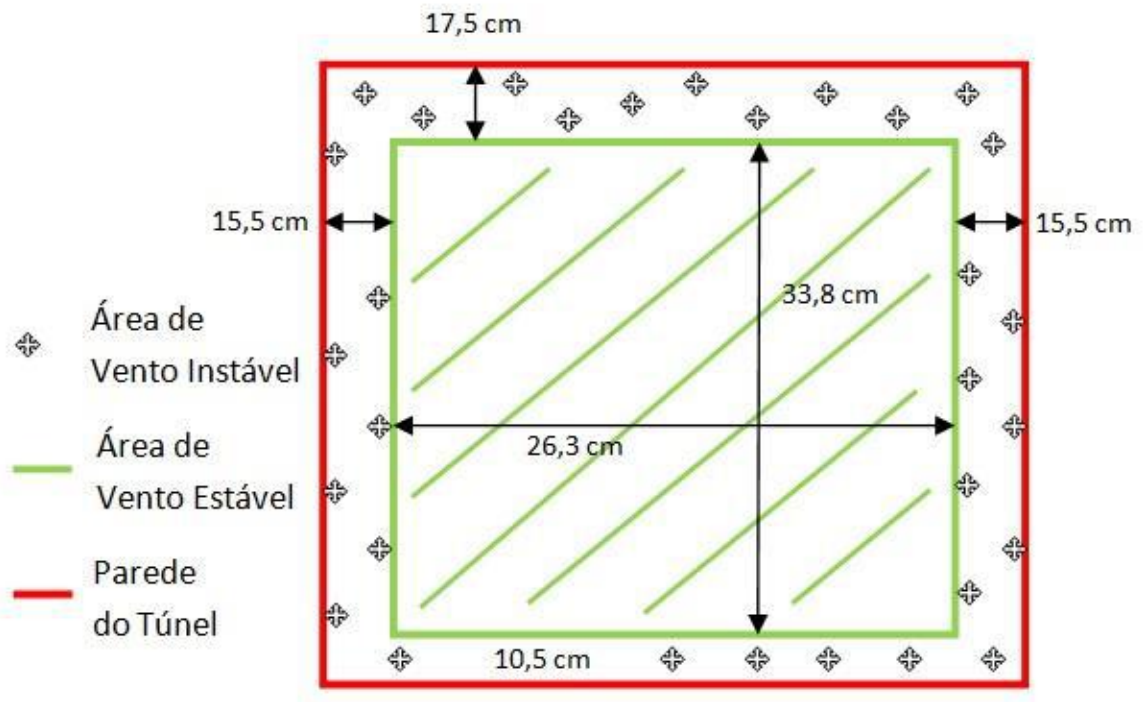


Figura 51. Desenho esquemático estendendo a seção interna do túnel de vento, distinguindo a área com ventos instáveis e a área com ventos de maior estabilidade.

Posteriormente, após serem feitas novas observações já utilizando a areia nos testes como descrito a seguir, foram adaptadas mudanças na análise do fluxo de ar e perfis de turbulência no túnel de vento.

9 TURBULÊNCIA E ADIMENSIONALIZAÇÃO DO MODELO

O primeiro trabalho experimental de modelo em escala sobre o desenvolvimento de dunas de areia foi realizado por Bagnold em 1941. Segundo ele, o design de seu túnel de vento teve que corresponder a várias especificações especiais. Diversos testes e designs não bem sucedidos foram feitos por ele até que um modelo satisfatório fosse criado. É possível encontrar toda teoria e prática desenvolvidas pelo autor em seu livro citado acima.

De acordo com Bagnold (*op. cit.*), as condições para similaridade de um fluxo de fluido devem ser consideradas em qualquer discussão comparativa de movimento de areia no ar ou água, e em investigações sobre a formação de dunas utilizando-se modelos como apresentado no presente trabalho.

A conexão entre modelos em escala e estruturas reais, e suas relações de medidas de velocidade e pressão, foram estudados pelo físico e engenheiro hidráulico irlandês Osborne Reynolds, em 1883.

O Número de Reynolds, ou R_e , corresponde à relação que define o comportamento de todos os fluidos, incluindo a transição de fluxo linear para turbulento. Segundo ele, se o tamanho do modelo L , ou no caso do fluxo em um tubo, o diâmetro do tubo seja dado por L , e a velocidade do fluxo no tubo seja dada por v ; o estado do fluido é definido pela sua viscosidade cinemática ν , e então o movimento do fluido será similar e a pressão não será modificada ao se obedecer a relação (Bagnold, 1941).

$$R_e = L.v/\nu \quad (13)$$

Um fluxo é dito ser linear ou laminar quando próximo à superfície e em qualquer ponto, a velocidade do fluxo é proporcional à sua distância desta superfície; e, ao longo da seção do tubo, tanto a pressão quanto o arraste nas paredes são proporcionais à média da velocidade do fluxo. Porém, quando o vento excede certa velocidade crítica, dependendo do tamanho do tubo, o fluxo começa a se tornar diferente e muda de laminar para turbulento. As linhas de fluxo do vento passam a assumir a forma de redemoinhos que giram em eixos de todas as direções (Bagnold, (*op. cit.*)).

Não é sempre aparente aos olhos se o fluxo de um fluido em um túnel ou tubo é linear ou turbulento, principalmente para casos onde a escala ou grão são muito pequenos. O movimento muitas vezes aparenta ser relativamente laminar, e, contudo pode ser que na realidade seja turbulento segundo as qualificações dadas por Reynolds.

Conforme afirmado por Bagnold (1941), foi descoberto que em um túnel quadrado ou tubo assim como utilizado no presente estudo, tirando os casos excepcionais, a transição entre os estados do fluxo linear para turbulento ocorre quando R_e é superior a 1400.

Então, de acordo com Reynolds, se o tamanho do modelo ou o diâmetro do tubo for reduzido à metade, o fluido somente se comportará da mesma maneira se utilizarmos o dobro da velocidade do fluxo ou mudarmos o estado do fluido (ou viscosidade cinemática) para metade de ν . E a partir do cálculo do Número de Reynolds será possível qualificar e quantificar as características do fluxo de ar ou água em questão.

9.1 Cálculos para o modelo

Garcia 2015 apud Gorecki 1998 afirma que os experimentos realizados em túnel de vento possibilitam a análise da estrutura atmosférica gerada pelo vento no interior da cavidade. Segundo Garcia (*op. cit.*), as velocidades aferidas dentro da seção de testes do túnel de vento utilizado nesta simulação, que foram aferidas com o auxílio de um anemômetro, não representam a exata velocidade longitudinal do fluxo de vento, mas sim uma velocidade efetiva, que é dada pela equação:

$$U^2_{\text{efetiva}} = \mathbf{u}^2 + \gamma^2 \mathbf{v}^2 + \lambda^2 \mathbf{w}^2 \quad (14)$$

“onde $u_i = (x, y, z)$ define a velocidade do vento na direção x_i , sendo que o eixo x está alinhado com a velocidade do vento média e a origem está no início da cavidade. Já que γ e λ são funções dos ângulos de incidência do vento e elevação, respectivamente. Uma vez que a componente de incidência do vento ao longo do túnel é praticamente zero, isto é, invariável, e testes de sensibilidade realizados por Jorgensen (1971), onde foram determinados que os valores de elevação na vertical variam entre 1,02 e 1,04 para o intervalo de 20 a 90 graus, a velocidade efetiva pode ser escrita na seguinte forma aproximada” (Garcia, 2015)

$$U_{\text{efetiva}} = \sqrt{(\mathbf{u}^2 + \mathbf{w}^2)} \quad (15)$$

Sendo \mathbf{w} a velocidade do vento na vertical, foi considerado para este estudo que \mathbf{w} seja próximo à zero, uma vez que o fluxo de ar gerado dentro do túnel de vento é primordialmente unidirecional horizontal. Então, para esta análise temos

$$U_{\text{efetiva}} \sim \sqrt{(\mathbf{u}^2)} \quad (16)$$

$$U_{\text{efetiva}} \sim \mathbf{u}$$

A velocidade efetiva (ou média) usada nos ensaios e testes deste trabalho corresponde a 5,11 m/s; valor próximo a 5 m/s, equivalente à velocidade limiar de cisalhamento para areias finas e muito finas conforme Garcia (*op. cit.*).

Para efeitos de cálculo do Número de Reynolds deste modelo, além dos valores de velocidade efetiva do vento, adotou-se o valor da viscosidade cinemática do ar como equivalente a aproximadamente $16,04 \times 10^{-5}$ m²/s, como determinado por Fox (1998) para temperatura de 30°C.

O valor do tamanho L do modelo para uma seção retangular pode ser calculado usando a dimensão característica, que equivale ao diâmetro equivalente (D_{eq}) no cálculo do Número de Reynolds. O mesmo pôde ser determinado a partir do raio hidráulico (R_H) abaixo, cujas definições estão disponíveis em Çengel e Cimbala (2015):

$$R_H = \frac{\text{área da seção transversal do escoamento}}{\text{perímetro em contato com o fluido}} \quad (17)$$

Para um retângulo com lados A e B, o raio hidráulico é:

$$R_H = \frac{A \cdot B}{2(A + B)} \quad (18)$$

E o diâmetro equivalente é $D_{eq} = 4R_H$

Então:

$$D_{eq} = \frac{2 \cdot A \cdot B}{A + B} \quad (19)$$

Os valores correspondentes a A e B, respectivamente largura e altura da seção de testes do túnel, são dados conforme a tabela abaixo:

Largura	0,57 m
Altura	0,61 m

Tabela 1. Valores de medidas encontradas no túnel de vento utilizado na presente análise.

Com base nos valores acima, o diâmetro equivalente do túnel de vento é igual a 0,5893 metros. Assim, o valor calculado para $R_{e \text{ modelo}}$ é igual a 18.773, que caracteriza o fluxo de ar deste modelo como turbulento ($R_e > 1400$).

9.2 Modelo vs realidade

Com o intuito de comparar a equivalência entre modelo gerado e as condições reais do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, foram estipulados os valores de R_e da duna real e da duna modelo, levando em conta os dados disponíveis para cada um dos casos. Contudo, não foi possível encontrar estruturas semelhantes em ambas as dunas comparadas. Essa diferença impossibilita a equivalência dos Números de Reynolds estipulados para as mesmas, em termos de comprimento e também de velocidade do ar.

Para o cálculo do $R_{e \text{ real}}$ foram utilizadas as velocidades do vento efetivas estimadas neste estudo para cada estação do ano, visto a influência direta da mudança de estações no desenvolvimento dunar. Além disso, ao considerar a medida das dunas reais, foi utilizado o exemplo aferido por Gonçalves *et al.* (2003) e citado anteriormente na seção 1.3.1 (As Dunas Barcanas dos Lençóis Maranhenses) onde o comprimento da duna barcana é de 3 metros. Parte-se do princípio que a viscosidade cinemática do ar seja equivalente a usada no modelo. Os resultados obtidos se dão da seguinte forma:

Verão	$V_{\text{vento}} = 3,56 \text{ m/s}$	$R_{e \text{ real}} = 66.583$
Outono	$V_{\text{vento}} = 2,44 \text{ m/s}$	$R_{e \text{ real}} = 45.635$
Inverno	$V_{\text{vento}} = 3,49 \text{ m/s}$	$R_{e \text{ real}} = 65.274$
Primavera	$V_{\text{vento}} = 4,65 \text{ m/s}$	$R_{e \text{ real}} = 86.970$

Tabela 2. Valores de R_e real encontradas para o PNLM.

É importante esclarecer que a medida de comprimento da duna encontrada em Gonçalves *et al.* (*op. cit.*) corresponde à seguinte seção de uma barcana:

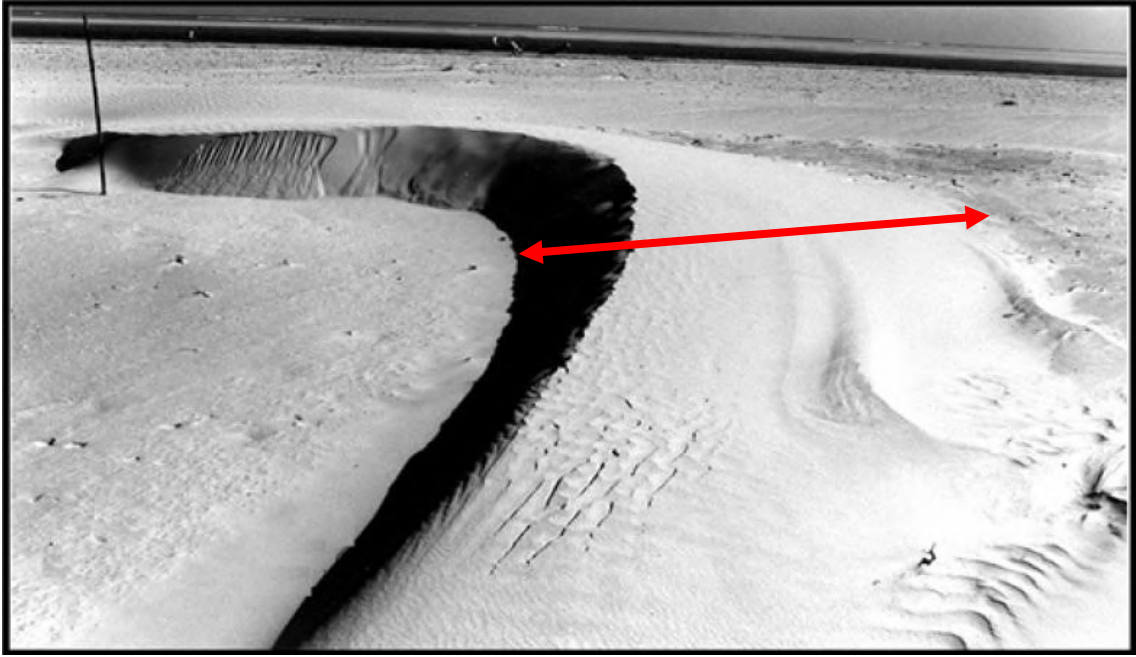


Figura 52. Comprimento da duna barcana. Figura modificada de Gonçalves *et al.*, 2003, fig. 2, p. 101.

Ao passo que para o modelo gerado, não foi observada a formação de estrutura equivalente para ser utilizada em comparação.

11 DESIGN DA PLATAFORMA MÓVEL

A partir das observações feitas com definição da zona de melhor qualidade do fluxo, foi desenvolvida uma nova peça, denominada pela a autora do presente trabalho como Plataforma Móvel (fig. 53 e 54), para tornar possível a elevação da duna, afim de dispô-la na zona de melhor estabilidade do túnel.

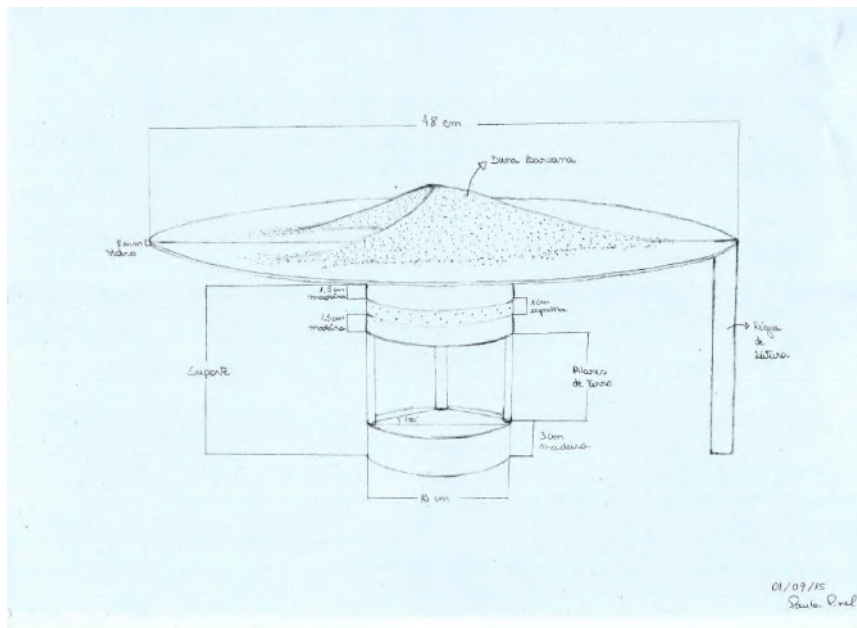


Figura 53. Planejamento da Plataforma Móvel. Ilustração da autora.



Figura 54. Plataforma Móvel. Foto da autora.

Como vantagens adicionais, a Plataforma Móvel pode ainda ser colocada em diferentes locais do túnel. O design da Plataforma Móvel teve como foco principal oferecer a maior liberdade possível para o desenvolvimento da duna dentro do túnel de vento. Essa liberdade foi proporcionada através da viabilização da mudança do ângulo da duna em relação ao vento, do ângulo de incidência do vento na duna e do fornecimento de estabilidade suficiente para garantir que a vibração do túnel causada pelo exaustor não interferisse nos estudos.

A partir das especificações desejadas, definiram-se então os materiais que seriam ideais para plataforma e suas principais características dentro das possibilidades financeiras do projeto. Para a construção das partes da Plataforma Móvel foram utilizadas três peças circulares de madeira, uma peça de vidro, uma barra roscada de 1 metro comprimento e 16 mm de espessura, espuma de estofado, um parafuso 15 mm, dez porcas e uma arruela (fig. 55).

Todo preparo e montagem do material para as peças da Plataforma Móvel foram feitos com o auxílio do Senhor Francisco, responsável pela manutenção do Centro de Tecnologia da UFRJ, Bloco A, 7º andar; e do amigo Juan Valani, colaborador ativo do presente trabalho e estudante de física da UFRJ (fig.56).



Figura 55. Material usado para construção da Plataforma Móvel. Foto da autora.



Figura 56. Processo de construção da Plataforma Móvel. Fotos da autora

A Plataforma Móvel se divide em duas seções principais: o prato e o suporte para o prato. O prato é a porção sobre a qual a duna se dispõe. Optou-se pelo vidro para construção deste por ser um material de baixo custo, resistente à deformação e de pequena espessura, 8 mm, que oferece segurança no suporte de peso e ao mesmo tempo causa interferência mínima no vento dentro do túnel.

Para usufruir do maior espaço possível dentro do túnel de vento e ao mesmo tempo obter a capacidade de variação angular do prato, definiu-se que o mesmo tivesse formato circular com diâmetro de 48cm. Sobre o prato foram aderidas lixas abrasivas 3M 211Q - Lixa D'água com fitas dupliface para simular a rugosidade original da superfície do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses, que é coberto por areia fina bimodal. Sobre essas lixas foram desenhadas marcações com régua e lápis de cor com o objetivo de facilitar a visualização do movimento da duna (fig. 57).

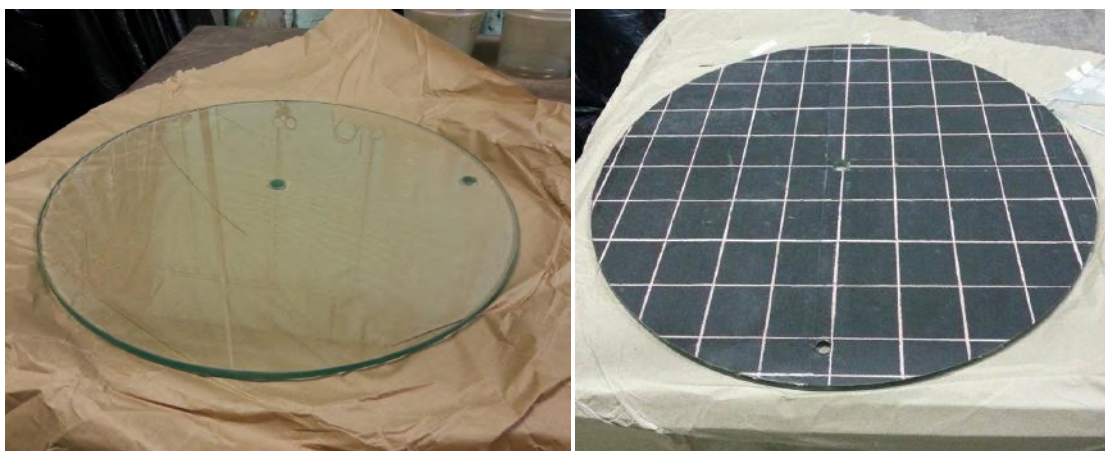


Figura 57. Esq. prato de vidro com os furos central e lateral para encaixe do parafuso e da barra de leitura respectivamente, e dir. prato coberto com lixa e marcado com lápis de cor. Fotos da autora.

Para auxiliar na leitura da variação do ângulo da duna ao girar o prato da plataforma, foi feito um furo na lateral do prato onde pode ser anexada uma barra. Essa barra estende-se até o final da plataforma (fundo do túnel) e visa marcar com precisão a variação do ângulo a medida em que gira-se o prato.

O suporte para o prato é composto por três partes: o topo, os pilares de ferro e a base. O topo e a base são feitos de madeira e têm forma circular com diâmetro de 20cm, que é suficiente para sustentar o peso do prato e manter seu equilíbrio. Tal material foi doado para o projeto pela oficina da UFRJ localizada no Centro de Tecnologia, bloco A, 4º andar. O topo do suporte é feito por dois discos de madeira de 2,0 cm de espessura separados por espuma comum de estofado para auxiliar na absorção da vibração da plataforma (fig. 58 e 59). O topo do suporte é ainda a superfície que fica diretamente em contato com o prato e, portanto, o prato e o topo do suporte são ligados entre si por um parafuso preso por porca e arruela para proporcionar mobilidade.



Figura 58. Suporte para o prato: topo, base, pilares, parafusos, porcas, arruelas e barra roscada. Foto da autora.



Figura 59. Topo do suporte: peças de madeira separadas por espuma de estofado. Foto da autora.

Os pilares do suporte são 3 pedaços de 23 cm de barra roscada dispostos simetricamente para encaixar na base e no topo do suporte (fig. 60). Esse encaixe é feito através de perfurações nas peças da base e do topo de diâmetro suficiente para o encaixe dos pilares. O material escolhido para compor os pilares foi a barra roscada devido à sua resistência física e ao seu peso, que ajuda a estabilizar a plataforma como um todo. Além disso, a barra permite que, com o auxílio das porcas, o nível da plataforma possa ser ajustado sempre que preciso para resultar sempre em uma superfície horizontalmente ajustada onde a duna possa se desenvolver.



Figura 60. Base do suporte e pilares com porcas. Foto da autora.

A base do suporte é uma peça maciça de madeira de 3cm de espessura, como pôde ser observado na figura 61, com 3 porcas embutidas para que seja possível encaixar e fixar os três pilares. Os três pilares são firmados na base com o auxílio de mais 3 porcas externas.

12 TESTES COM AREIA

12.1 Teste I

O primeiro teste, ou teste I, foi realizado sobre a Plataforma Móvel com inclinação ajustada para zero com o auxílio de uma bússola tipo Brunton (fig. 61).



Figura 61. Prato da Plataforma Móvel, cone inicial de areia e bússola para ajustar a inclinação da superfície do prato. Foto da autora.

Para despejar a areia sobre o prato da plataforma em forma de cone, estrutura próxima à curva Gaussiana adotada por Herrmann e Sauermann (2000) e possível ser construída, foi utilizado um suporte de ferro com funil acoplado, seguindo o padrão de construção do cone de areia inicial feito por Medeiros (2015). Ao utilizar esse suporte, de altura máxima 21 cm, a altura de queda da areia até o prato da plataforma é de 14 cm (fig. 62).

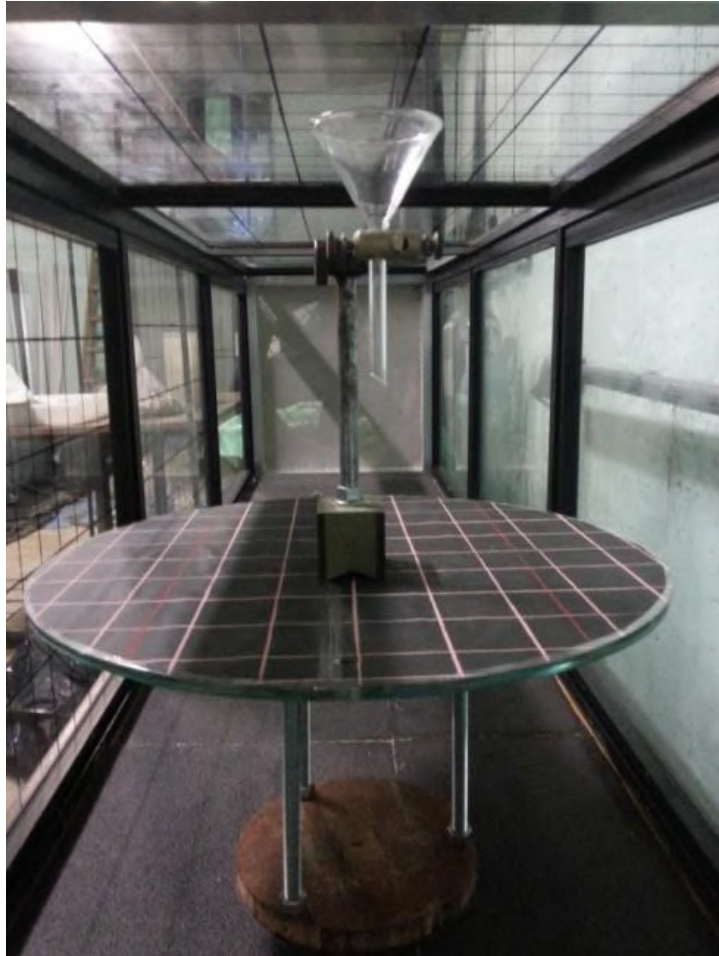


Figura 62. Suporte de ferro com funil acoplado usado para despejar a areia sobre a Plataforma Móvel.
Foto da autora.

Durante os todos os testes, para economizar a amostra de areia coletada no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, utilizou-se a amostra de areia coletada na Praia do Però, pertencente ao Município de Cabo Frio, RJ. Essa amostra é denominada Però 2 e foi descrita anteriormente por Garcia (2015) e Medeiros (*op. cit.*). A amostra de areia Però 2 possui características sedimentológicas muito semelhantes às encontradas para a amostra dos Lençóis Maranhenses, o que garantiu a compatibilidade dos testes realizados. Para o Teste I, foram utilizadas aproximadamente 260g de areia.

Inicialmente, adotou-se o quadrante do túnel de vento mais próximo à entrada de ar do sistema para realizar o Teste I devido à presença de maiores valores de velocidade constatados nessa região durante o mapeamento realizado. No Teste I, a Plataforma Móvel foi colocada na posição 1, conforme a figura 63 abaixo:

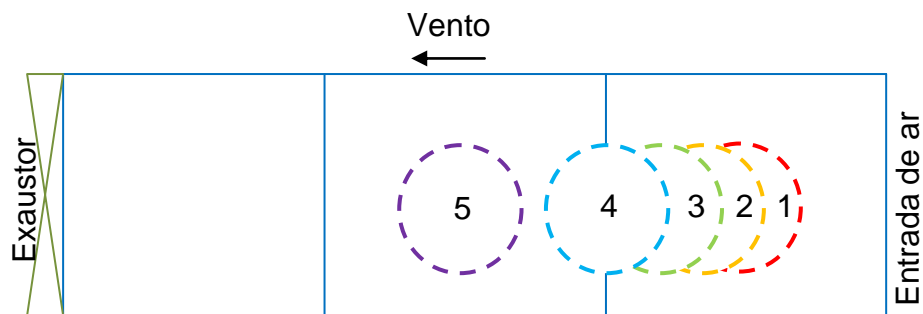


Figura 63. Desenho esquemático em planta do túnel de vento com as posições adotadas (1, 2, 3, 4 e 5) para a base Plataforma Móvel durante a realização dos testes e ensaios.

Sendo que, com relação à posição do cone inicial sobre o prato da plataforma, a localização adotada foi a borda mais próxima à entrada de vento, como pode ser observado na figura 64.



Figura 64. Teste I e localização do cone inicial sobre o prato da plataforma. Foto da autora.

Observações Teste I:

A amostra de areia disposta no cone inicial não apresentou nenhuma migração de grãos após 2 horas de teste, com ventos de 4,14 m/s. Como feições de coesão na areia relacionadas à umidade puderam ser observadas durante a construção do cone inicial, foi

decido que um novo teste seria realizado, desta vez com a areia previamente seca em estufa (fig. 65).

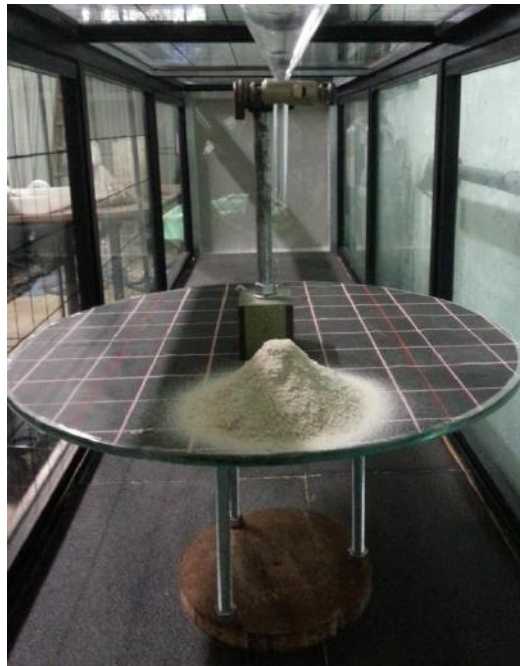


Figura 65. Teste I, cone inicial e feições de coesão na areia. Foto da autora.

12.2 Teste II

Ao realizar o Teste II, foram mantidas as condições de construção do cone de areia inicial adotadas no Teste I, assim como massa de areia e o tipo da amostra utilizados.

A amostra do Teste II passou por um período de secagem em estufa de 4 horas, à temperatura de 100°C. Além disso, a posição de início adotada para locação da Plataforma Móvel corresponde à posição 2, presente no desenho esquemático da (fig. 63). Nesta posição, a velocidade do vento é de 4,76 m/s.

Observações Teste II:

A amostra seca em estufa deu origem a um cone inicial mais homogêneo do que no Teste I, assim como era desejado (fig. 66). Com a Plataforma Móvel na posição 2, foram realizadas 164 horas de teste. A partir do jato inicial de vento, a areia demonstrou um movimento aleatório dos grãos, onde muitos caíram para fora da Plataforma Móvel por diversos lados. Essa mobilização aleatória durou cerca de 30 segundos, acompanhando o deslizamento de algumas camadas de areia na medida em que a base do cone inicial era erodida, até a sua estabilização. Feições irregulares foram formadas sobre o prato da plataforma como pode ser observado na figura 67.



Figura 66. Teste II e o cone inicial de areia. Foto da autora.

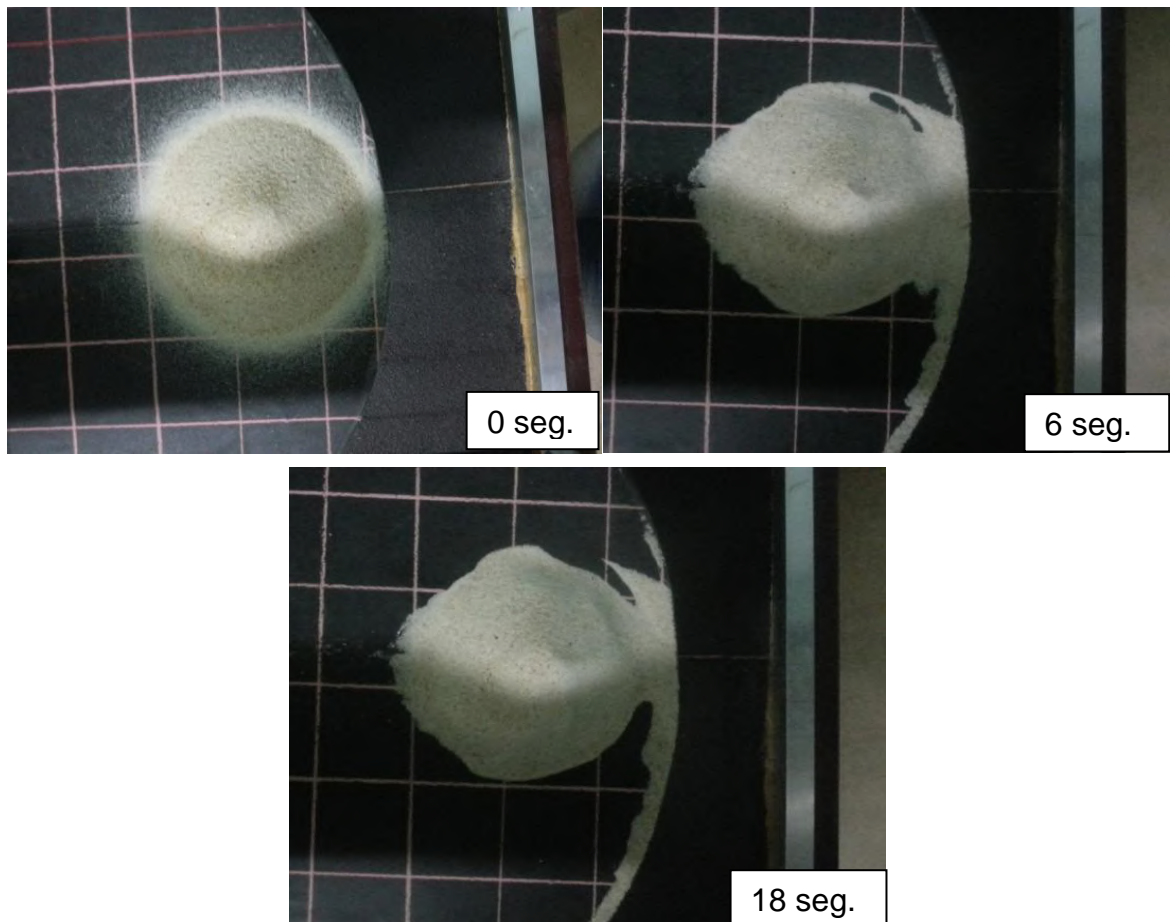


Figura 67. Imagem comparativa do desenvolvimento do cone de areia em diferentes momentos do Teste II na posição 2. Fotos da autora.

Como pôde ser observado na figura 67, após o momento inicial do Teste II houve pouca mobilização da areia. A Plataforma Móvel foi então transferida para a posição 3 (fig. 63), onde a velocidade do vento atinge cerca de 4,80 m/s. Os grãos de areia do cone inicial ainda não apresentaram migração significativa mesmo com o aumento da velocidade. O Teste 2 foi então transferido de posição mais uma vez, neste caso para a posição 4. Novamente houve um aumento da velocidade do vento, correspondente a 4,87 m/s, contudo os resultados de movimentação dos grãos também não foram satisfatórios (fig. 68).

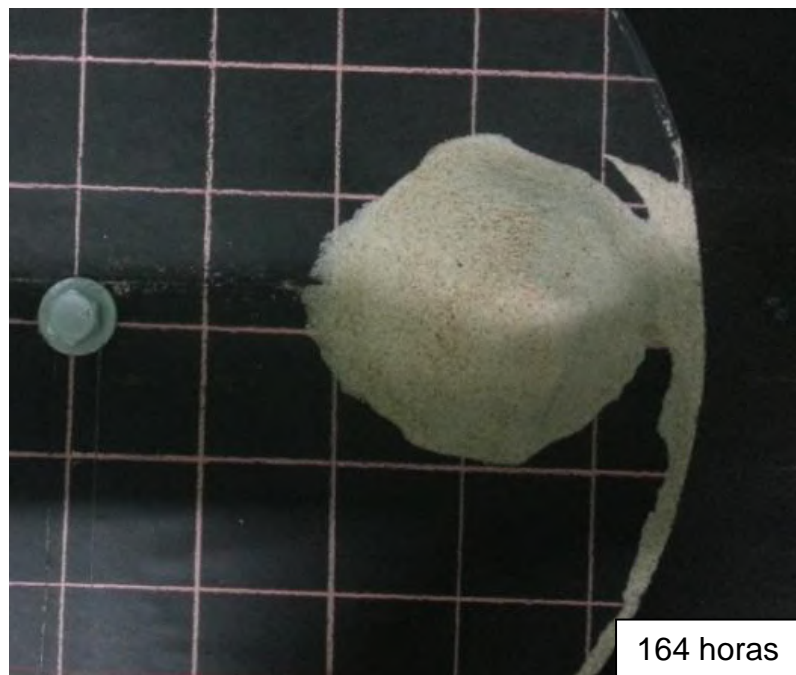


Figura 68. Conformação final do cone de areia Teste II.

12.3 Teste III

O Teste III analisou a influência da modificação da localização da duna sobre o prato da plataforma. Neste teste a duna foi posicionada no centro do prato, como pode ser observado na figura 69. Além disso, a posição da Plataforma Móvel foi modificada para posição 5, mais próxima ao exaustor (fig. 63). As características da amostra de areia utilizada no Teste III foram as mesmas presentes nos testes anteriores.

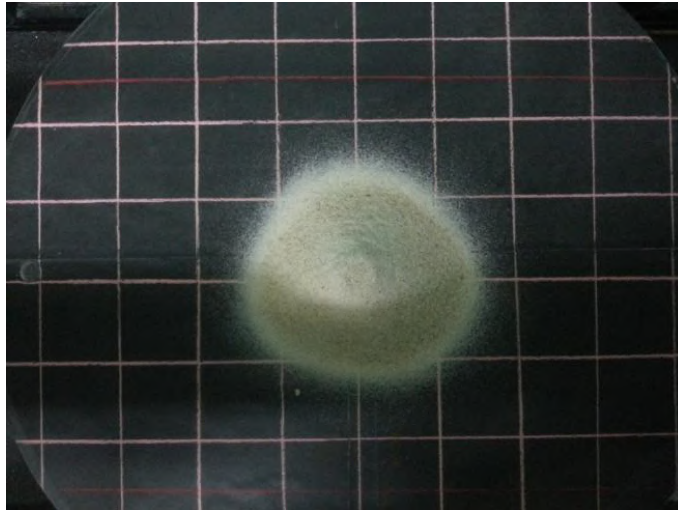


Figura 69. Teste III e posição central do cone inicial de areia. Foto da autora.

Observações Teste III

Ao posicionar a Plataforma Móvel na posição 5, a velocidade máxima adquirida pelo vento foi de 4,29 m/s, valor abaixo do esperado. Com a baixa velocidade do ar atingida na posição 5, não foi observada nenhuma migração da amostra de areia do cone inicial.

A Plataforma Móvel foi então recolocada nas posições onde os testes anteriores demonstraram velocidades maiores (posições 2, 3 e 4). Contudo, mesmo tendo sido observado um aumento na velocidade, as novas velocidades não ultrapassaram as quantificadas nos testes I e II como desejado. A nova configuração da duna ocasionou essas mudanças no comportamento do vento que influíram no transporte dos grãos de areia.

12.4 Teste IV

Visando dar continuidade a busca pelo aprimoramento das condições do túnel de vento, retirou-se o suporte da Plataforma Móvel durante o Teste IV, deixando o prato diretamente sobre o fundo da câmara de testes para analisar a influência do suporte no fluxo de ar. Ao posicionar o prato sobre o fundo do túnel de vento, obtem-se uma superfície mais longa para que o vento se desenvolva antes de chegar até a duna.

Nos testes anteriores foi possível notar a necessidade de maiores perfis de velocidade do vento. Com esse intuito, o exaustor responsável por gerar vento dentro do túnel foi reposicionado para posição ventilador.

A amostra de areia utilizada no Teste IV permaneceu a mesma dos demais testes, exceto pelo fato de que foram acrescentadas mais 90g de areia. O acréscimo na amostra correspondeu a última camada de areia colocada sobre o cone, sendo esta colorida com Violeta Genciana 1% para facilitar a visualização do deslocamento dos grãos (fig. 70). Foram dissolvidos 5 ml de Violeta Genciana 1% em 60 ml de água destilada para colorir 90g de amostra. No total, foram utilizadas 350g de areia no cone inicial.



Figura 70. Violeta Genciana 1% (esq.) e cone inicial Teste IV (dir.). Fotos da autora.

O prato foi colocado na posição denominada Ideal, definida após o novo mapeamento do campo de ventos dentro do túnel após as mudanças na disposição dos aparatos (p. 105).

Observações Teste IV:

A partir das modificações feitas, o campo de ventos que passou a soprar para dentro do túnel gerou um fluxo de ar vindo da parede direita da câmara de testes. O resultado foi uma estrutura que evoluiu rapidamente devido ao aumento excessivo da velocidade do vento, que deixou de ser linear. Acredita-se que a presença do tubo do ventilador (30 cm de comprimento) e do motor do exaustor (14 cm de diâmetro) para dentro do túnel tenham influenciado na geração de vórtices na câmara, o que justificaria o vento vindo da parede direita da mesma. O comprimento de 2 m do túnel de vento seria curto para que o vento soprando dentro da câmara formasse um fluxo laminar e pudesse ser usado neste experimento com dunas de areia.

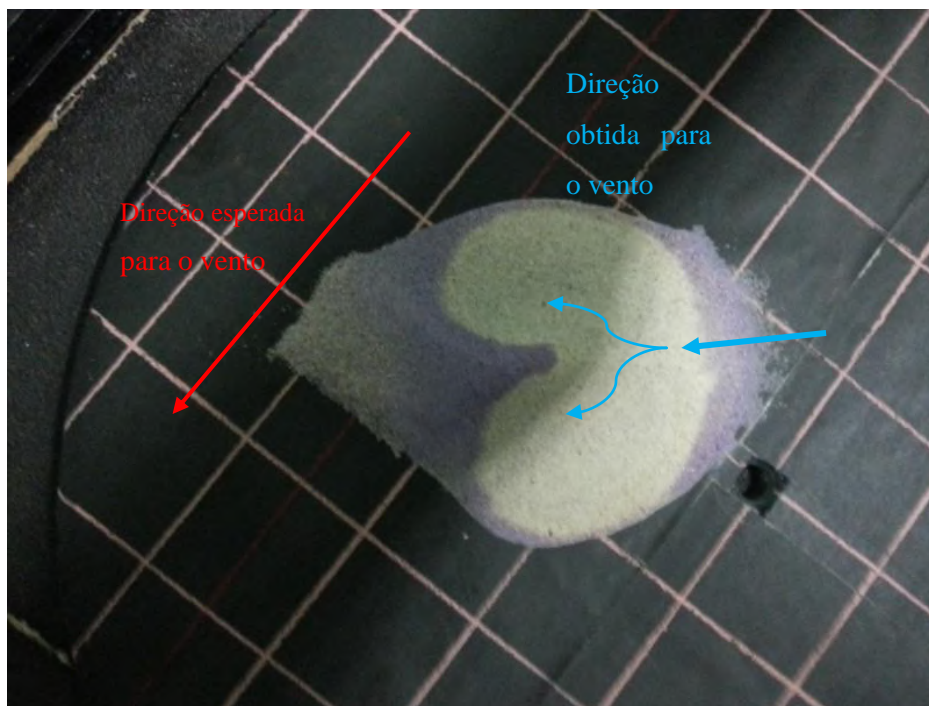


Figura 71. Configuração final Teste IV. Camada externa colorida com Violeta Genciana se destacando na parte interna do monte de areia. Desenho esquemático mostrando as direções esperada e obtida para o vento.
Foto da autora.

12.5 Teste V

O Teste V foi realizado com o prato da plataforma sobre o fundo do túnel de vento, porém com o exaustor de volta para a posição inicial, soprando fora da câmara. Foram mantidas a localização do cone inicial (centro do prato), a massa total de amostra (350g, sendo 90g coloridas com Violeta Genciana), o tipo da amostra (Peró 2), e a posição Ideal para o prato da plataforma.

Para o Teste V foi determinado o perfil do campo de ventos que circunda o cone inicial de areia tendo como auxílio um anemômetro de ventoinha (fig. 72).

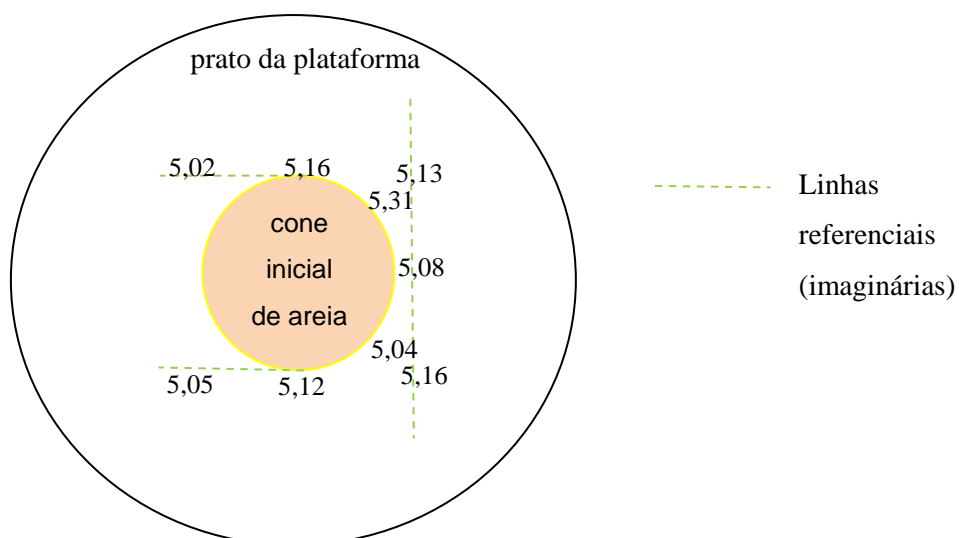


Figura 72. Perfil do campo de ventos que circunda o cone inicial de areia com valores de velocidade em metros por segundo referente a cada posição indicada.

Observações Teste V

Após 17 horas de teste, foi possível visualizar a mudança do cone inicial para uma estrutura mais aerodinâmica, de forma abaulada principalmente na parte médio/superior do objeto. A movimentação lenta e gradual dos grãos de areia foi considerada satisfatória e suficiente para dar origem ao objeto aerodinâmico desejado, que é a duna barcana. As configurações alcançadas neste teste foram definidas como as configurações que serão usadas para o ensaio oficial com a amostra original do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Distingue-se que para o ensaio oficial foram contabilizadas mais horas de teste.

13 ESTUDO AERODINÂMICO COMPLEMENTAR

A seção da câmara de testes teve seu fluxo de ar reavaliado com mais precisão após a realização dos Testes de I a IV. Adotou-se mais uma vez o método de observação do fluxo ar usando a grade com fitilhos, porém desta vez baseando os detalhes no artigo de Bill Montagne (2009). Foram utilizando fios de linha de costura aderidos às paredes do túnel como moldura e grade, e as interseções dos fios como suporte para a amarração das fitas, desta vez feitas de tecido. A linha de costura exerce uma influência mínima no fluxo de ar, e as fitas de tecido são extremamente leves e maleáveis, ideias para fluir junto ao vento.

O novo método de grade com fitilhos teve sua configuração determinada como ilustra a figura 73 abaixo:

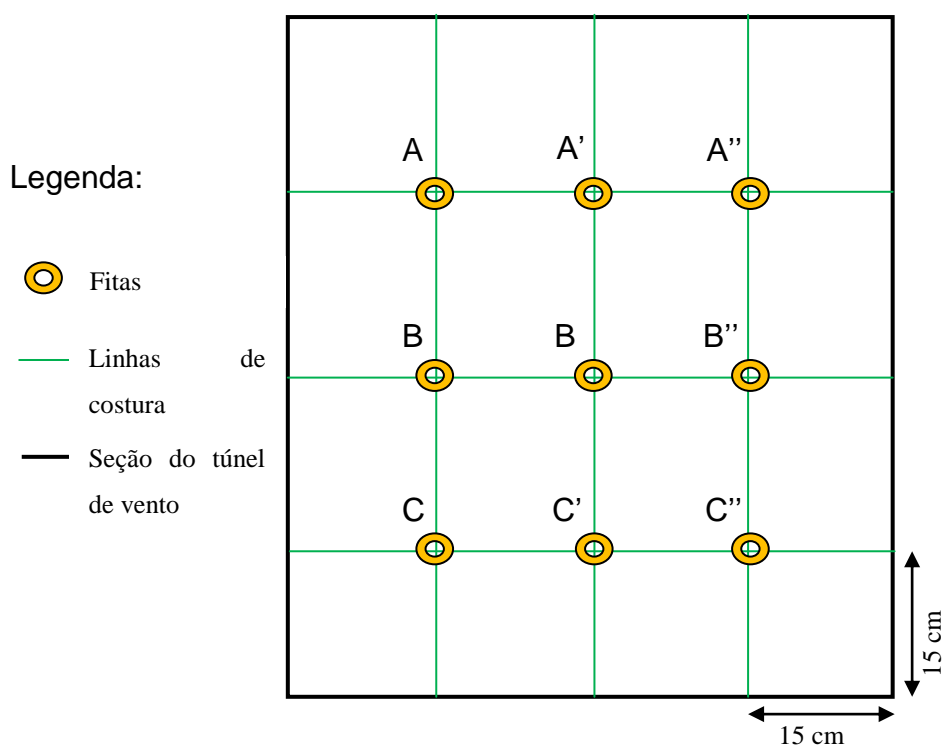


Figura 73. Desenho esquemático da seção interna do túnel, ilustrando a configuração do método de grade com fitilhos.

O espaçamento adotado entre os fios foi escolhido para representar os principais quadrantes da seção do túnel. As fitas de tecido utilizadas possuem 7cm x 1cm para gerar boa visualização do fluxo de ar.

Abaixo, na figura 74, encontra-se a imagem real desse método de visualização do vento:



Figura 74. Foto da seção interna do túnel e o método de grade com fitilhos. Foto da autora.

Os resultados obtidos para essa nova aplicação da metodologia de fitilhos foram condizentes com os resultados observados anteriormente nos testes preliminares usando essa mesma técnica. Mais uma vez, a parte superior da seção de ensaios mostrou-se muito instável e com inversão de sentido do fluxo de ar. As laterais da seção próximas às paredes apresentam um fluxo de ar “trêmulo” considerado insatisfatório para os ensaios. As áreas central e inferior foram determinadas novamente como sendo ideias para localização dos testes com areia aqui realizados.

A aerodinâmica do vento também foi analisada detalhadamente sobre o prato da plataforma, quando este encontra-se no fundo do túnel de vento. O método utilizado por Bill Montagne (2009) foi mais uma vez adaptado a este estudo, agora com fitas de tecido aderidas sobre a superfície de testes para que fosse possível avaliar a linearidade do ar nesse local (fig. 75).

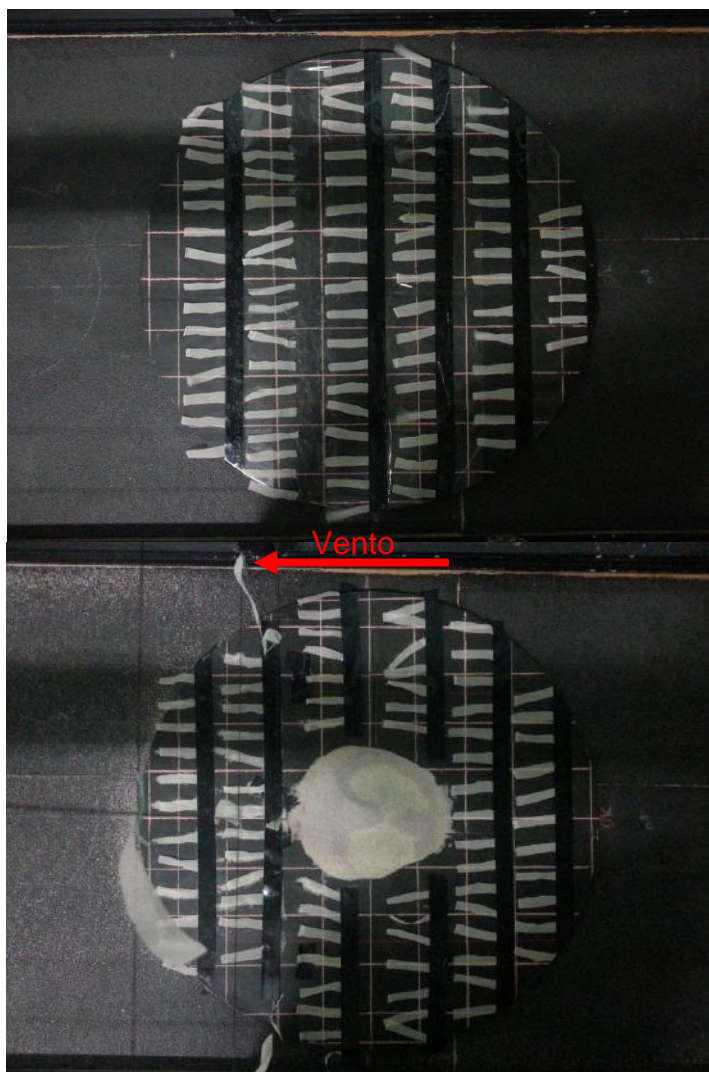


Figura 75. fotos em planta do método utilizado Bill Montagne (2009) adaptado sobre o prato da plataforma, com e sem a presença do corpo de areia. Fotos da autora.

As fitas de tecido usadas nos experimentos acima possuem 4cm x 1cm e foram dispostas em maior número possível com espaçamento regular.

Os resultados analisados mostram que o fluxo de vento ao longo dessa superfície é linear e ideal para realização dos ensaios.

13.1 Mapeamento detalhado das velocidades do vento

Seguindo a metodologia de mapeamento de ventos utilizada por Garcia (2015), com o auxílio de um anemômetro de ventoinha foram quantificadas as velocidades do vento ao longo do túnel de forma esquemática. Seguem abaixo ilustrações da configuração usada e os dados obtidos na análise:

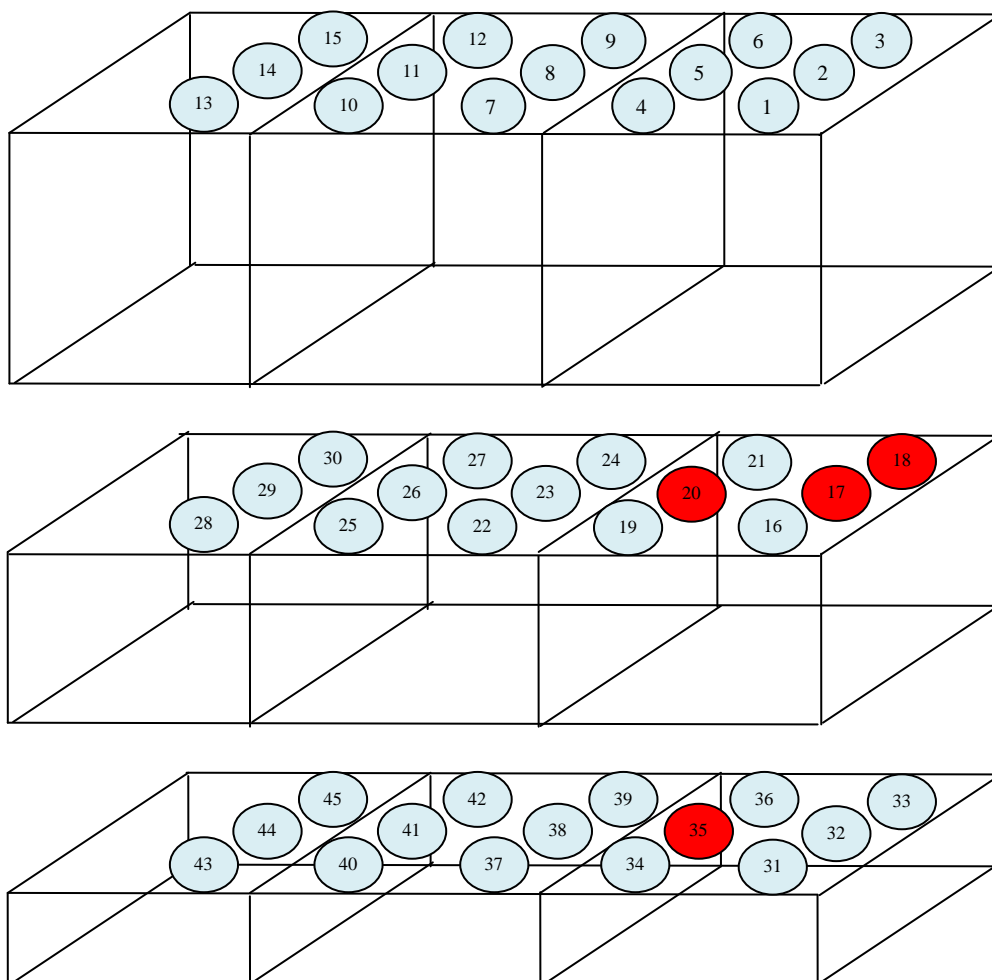


Figura 76. Desenho esquemático da seção interna do túnel de vento e as posições onde foram medidas as velocidades do ar. Destaque em vermelho para as posições onde foram medidas velocidades acima de 5 m/s.

Posição	Velocidade (m/s)	Posição	Velocidade (m/s)	Posição	Velocidade (m/s)	Posição	Velocidade (m/s)
1	1,64	13	1,37	25	3,16	37	4,68
2	1,59	14	2,6	26	4,43	38	4,87
3	0,88	15	3,39	27	4,58	39	3,39
4	1,91	16	4,78	28	3,03	40	3,27
5	2	17	5,63	29	3,92	41	4,6
6	1,1	18	5,32	30	4,02	42	4,56
7	1,81	19	4,51	31	4,99	43	3,92
8	2,34	20	5,44	32	4,89	44	4,17
9	2,34	21	4,82	33	3,87	45	3,22
10	1,28	22	4,11	34	4,77	-	-
11	2,05	23	4,74	35	5,02	-	-
12	2,46	24	4,71	36	2,11	-	-

Tabela 3. Dados de velocidade do vento relativos a cada posição da seção interna do túnel de vento.

A partir da análise dos valores obtidos no mapeamento das velocidades do vento e das observações feitas com o método da grade de fitilhos, foi possível concluir que a posição ideal para realização dos ensaios com areia de duna corresponde ao número 35 do desenho esquemático. Nesta posição a velocidade do vento é acima de 5 m/s, mínima para causar a movimentação da areia, e o fluxo de ar é linear, condizente com as condições naturais do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Para a realização do ensaio com a areia dos Lençóis Maranhenses, a posição 35 foi denominada Posição Ideal.

Vale ressaltar que as posições de número 17, 18 e 20 foram descartadas devido à instabilidade do fluxo de ar observada anteriormente através do método de grade com fitas.

14 ENSAIO OFICIAL

Como visto anteriormente no capítulo de Testes com Areia, os detalhes utilizados para a realização do ensaio oficial no túnel de vento foram determinados com base experimental usando o método de tentativa e erro.

Foi designado que o ensaio oficial seria feito com 350 gramas de areia original do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, usando um suporte de ferro com funil acoplado para construção do cone de areia inicial. A areia foi disposta centralmente sobre o prato da plataforma, apoiado no fundo da câmara de testes do túnel de vento. A posição do prato da plataforma é a Ideal, como especificada anteriormente no subcapítulo 13.1, e o vento, soprado para fora da câmara de testes. A configuração inicial do ensaio oficial descrita acima pode ser observada na figura 77.

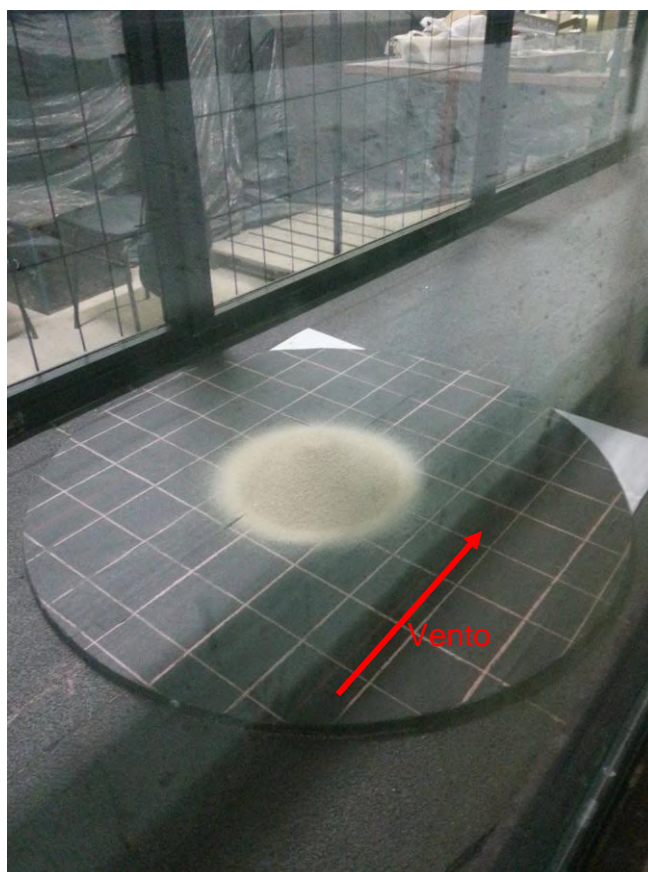


Figura 77. Configuração inicial do ensaio oficial. Foto da autora.

O cone inicial de areia da figura acima possui 18 centímetros de diâmetro e 3,5 centímetros de altura.

Ao final do ensaio oficial foram contabilizadas 164 horas duração, sendo essas separadas em dias diferentes para evitar o superaquecimento do exaustor.

14.1 Resultados

A evolução do cone de areia se deu conforme a figura 78 abaixo:

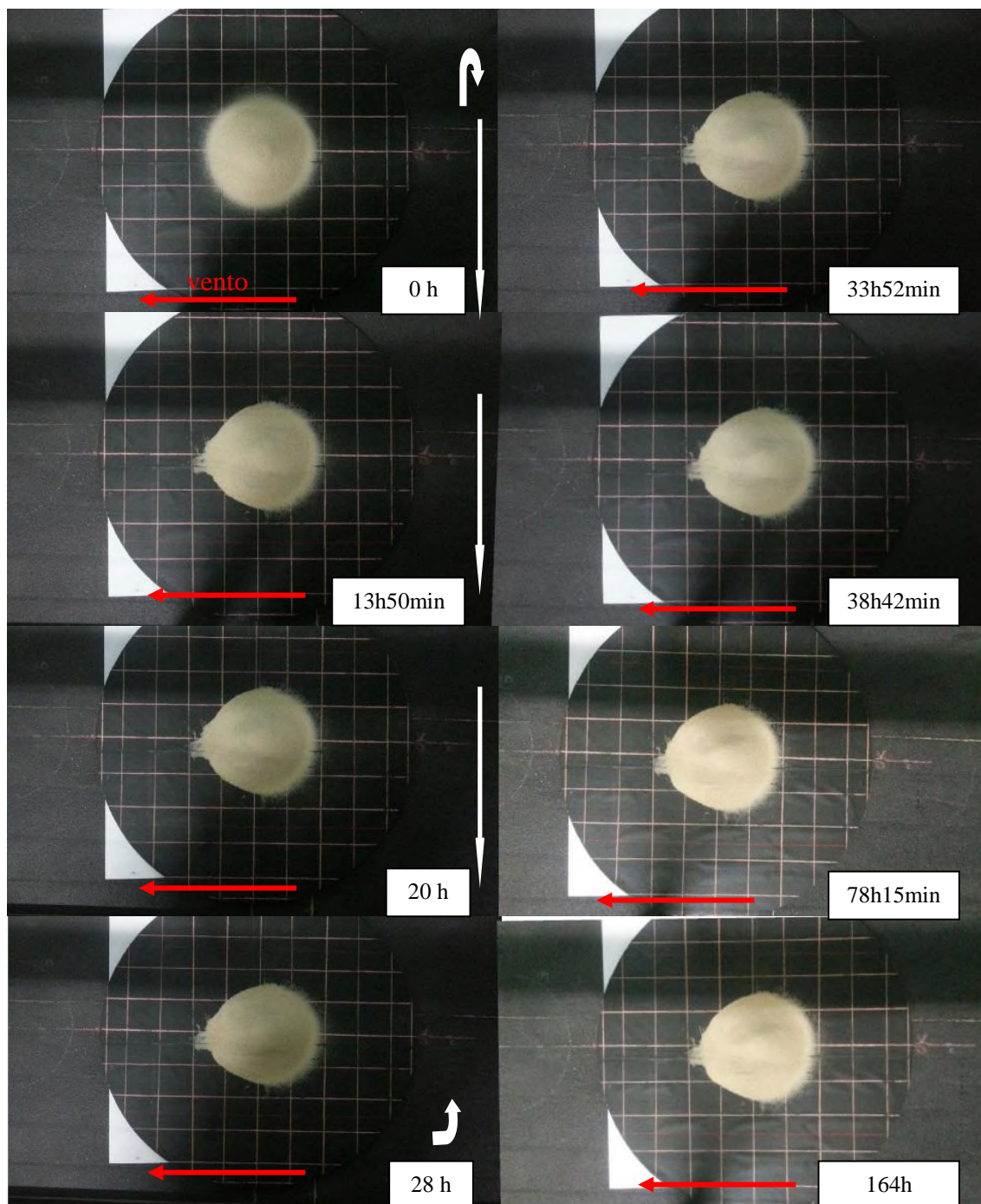


Figura 78. Quadro comparativo dos momentos de evolução do cone de areia do ensaio oficial. Fotos da autora.

Através das fotos vistas de cima dos momentos inicial e final é possível definir parte das zonas de erosão e deposição na forma de areia (fig. 79).

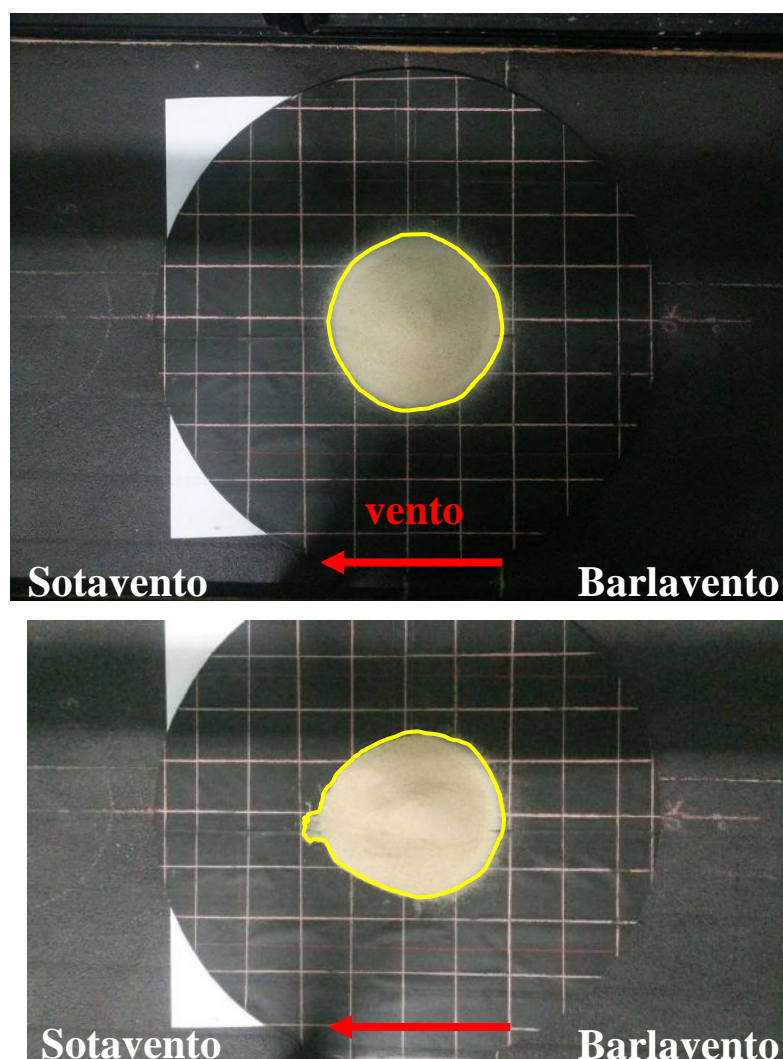


Figura 79. Momentos inicial e final do ensaio oficial em destaque amarelo. Fotos da autora.

Pela observação da figura 79, é possível notar que a porção a sotavento da forma de areia sofreu grande erosão. Ainda em sotavento, houve o desenvolvimento de um bico central causado pela deposição da areia. A porção a barlavento manteve-se praticamente a mesma desde o início do ensaio.

Segundo a literatura, a erosão em dunas barcanas reais ocorre rente à superfície de apoio (chão); sendo que os grãos de areia são carreados de barlavento pelas laterais da duna e, posteriormente, depositados por trás da crista do corpo de areia, dando origem aos braços das dunas barcanas. Dessa forma, era esperado que parte da areia erodida do cone inicial fosse depositada nas laterais por trás (sotavento) do corpo de areia. Contudo, foi observado no

ensaio oficial que parte da areia depositou-se no centro da porção sotavento, dando forma ao bico em destaque na figura 79.

É possível compreender mais detalhadamente o desenvolvimento da forma de areia do modelo ao analisar outros ângulos do objeto de estudo.

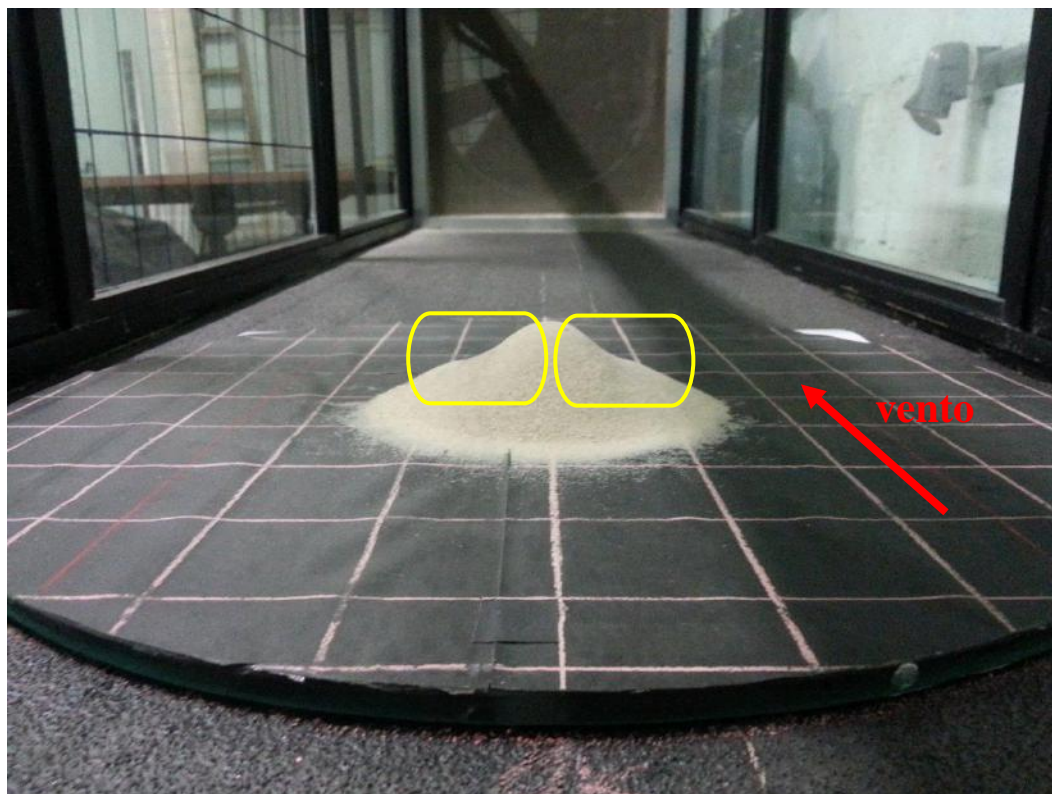


Figura 80. Imagem vista de barlavento da forma de estudo. Destaque em amarelo para as zonas de erosão na porção superior das laterais.

Diferentemente do esperado, outra parte da erosão ocorreu na porção superior das laterais da forma de areia. A retirada dos grãos formou cavidades, como pode ser observado em destaque na figura 80.

Um olhar atento em outro ângulo da vista de barlavento permite notar que além de ter formado cavidades laterais, a erosão da areia segregou os grãos por granulometria, deixando para trás um rastro de grãos não-silicáticos de cor escura e finos que ressaltam o traçado da remoção de grãos (fig. 81).

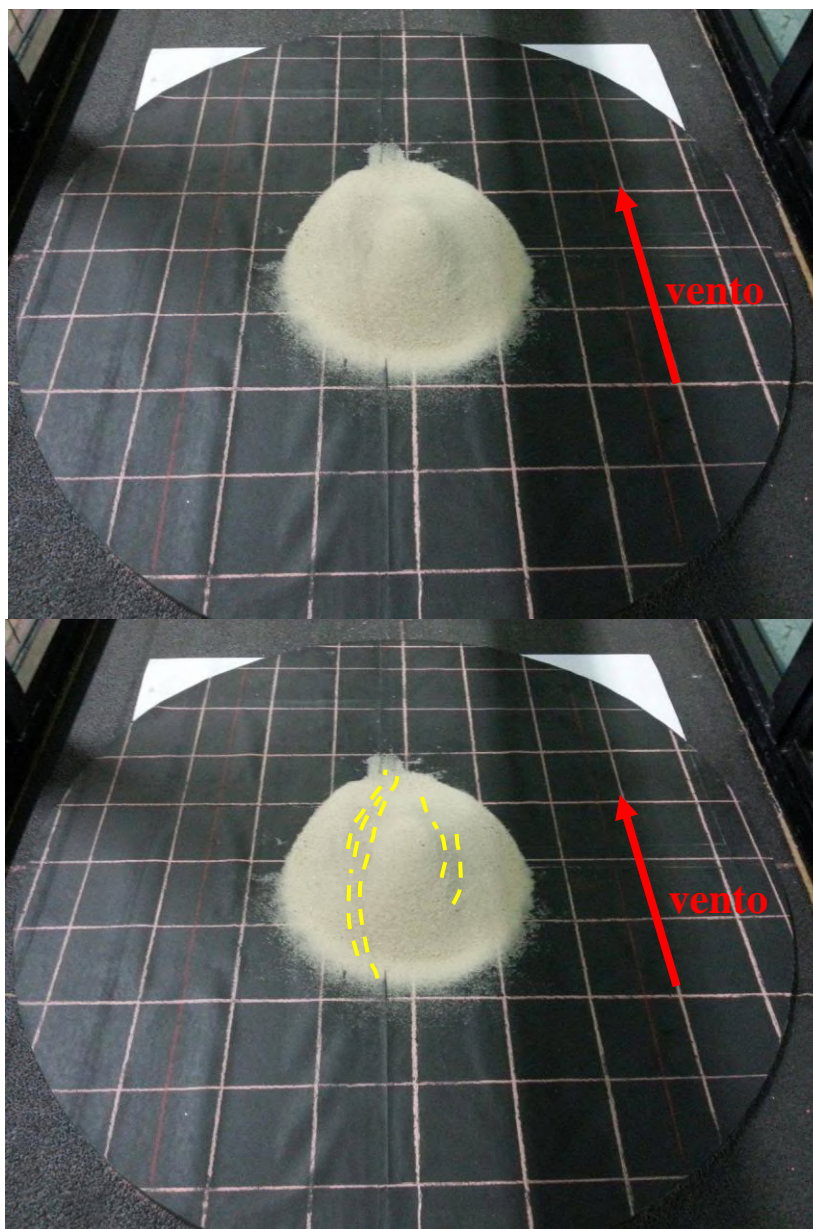


Figura 81. Traçado marcado pela erosão e seleção de grãos feita pelo vento. Fotos da autora.

A visão em perfil do corpo de areia formado no ensaio, como pode ser notada abaixo, é capaz de mostrar com clareza as partes que foram erodidas e que se tornaram depósitos ao longo do estudo.

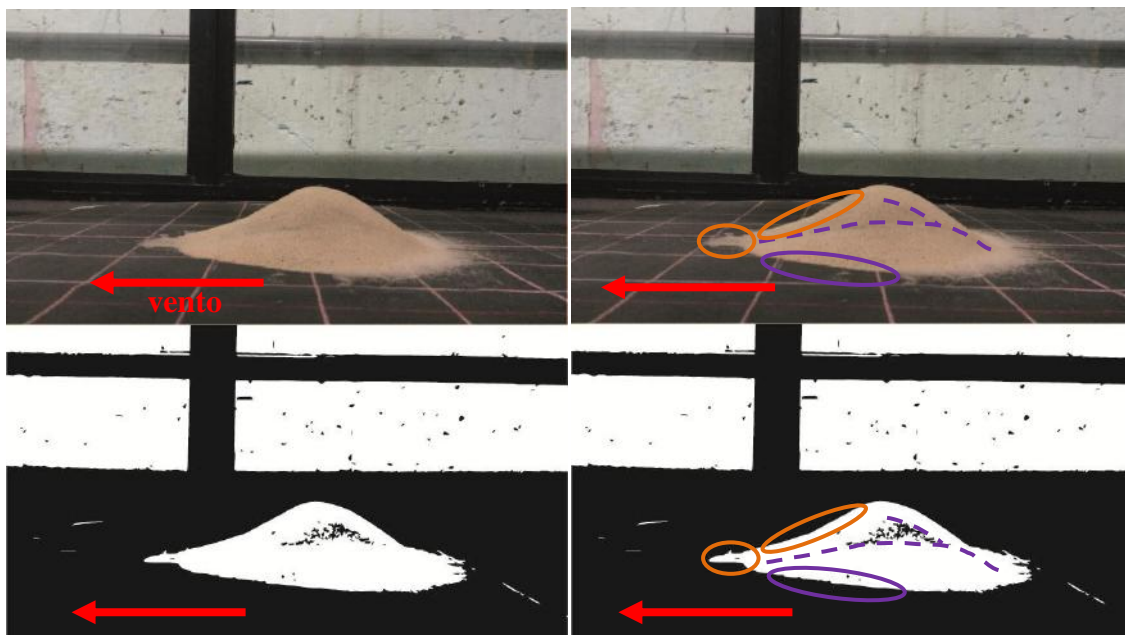


Figura 82. Imagens de perfil da forma de areia. Foto original natural e com contraste, além das mesmas com destaque para as áreas de erosão (em roxo) e deposição (em laranja). Fotos da autora.

14.2 Conclusão

Em termos comparativos, as principais distinções encontradas entre a forma do modelo aqui apresentado e as dunas reais estão nas áreas de erosão e deposição de areia. A movimentação dos grãos exerce um controle fundamental no desenvolvimento da duna.

Como citado anteriormente, as dunas barcanas reais possuem uma forma simples e muito característica, onde os grãos em barlavento são erodidos e carregados pelas laterais da duna até se depositarem em sotavento. Lá os grãos estão protegidos do vento pela crista que se forma no centro da duna e funciona como uma barreira de proteção, dando origem aos braços simétricos (fig. 83).

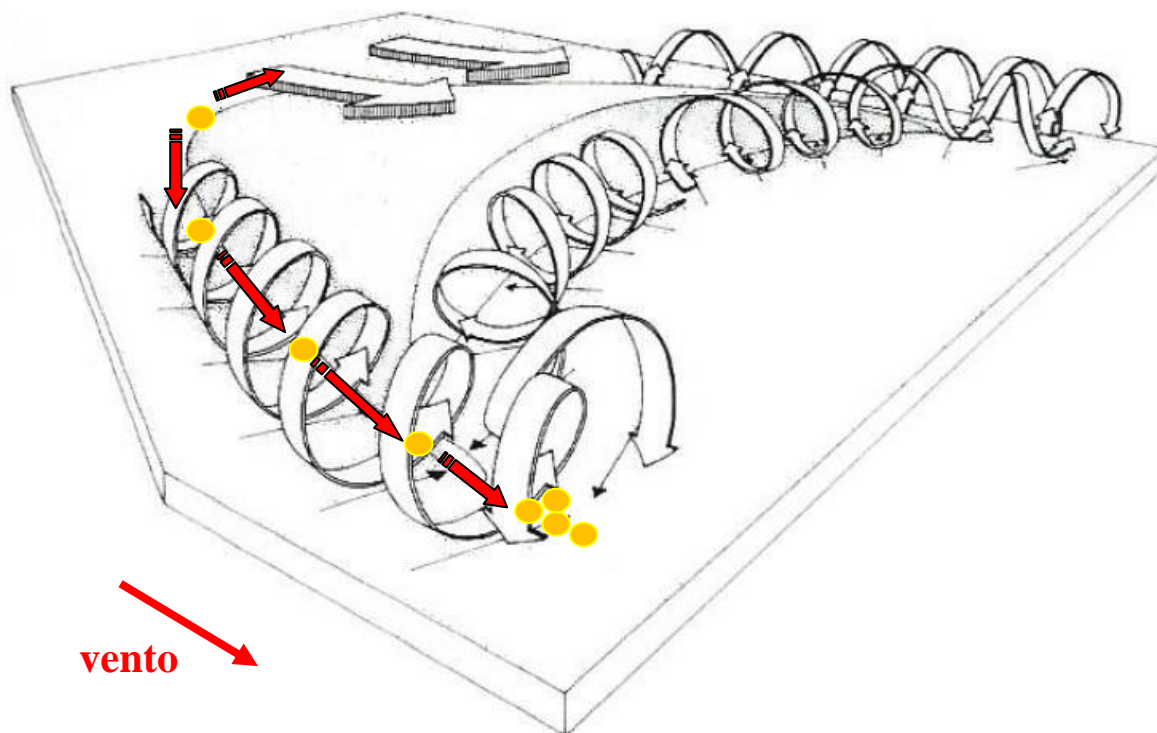


Figura 83. Padrão de fluxo de ar em uma duna barcana isolada reconstruído a partir de dados coletados em campo perto de In Salah na Algéria por P. Knott. Desenho esquemático em cores da movimentação lateral dos grãos de areia. Figura modificada de Summerfield, 1991.

O que foi observado para a forma do modelo, diferentemente da forma natural, marca processos de erosão laterais ao longo do trecho médio/superior do modelo, além de erosão na parte inferior a sotavento. O processo de deposição ocorreu centralizado, também a sotavento do modelo, como pode ser observado no esquema da figura 84.

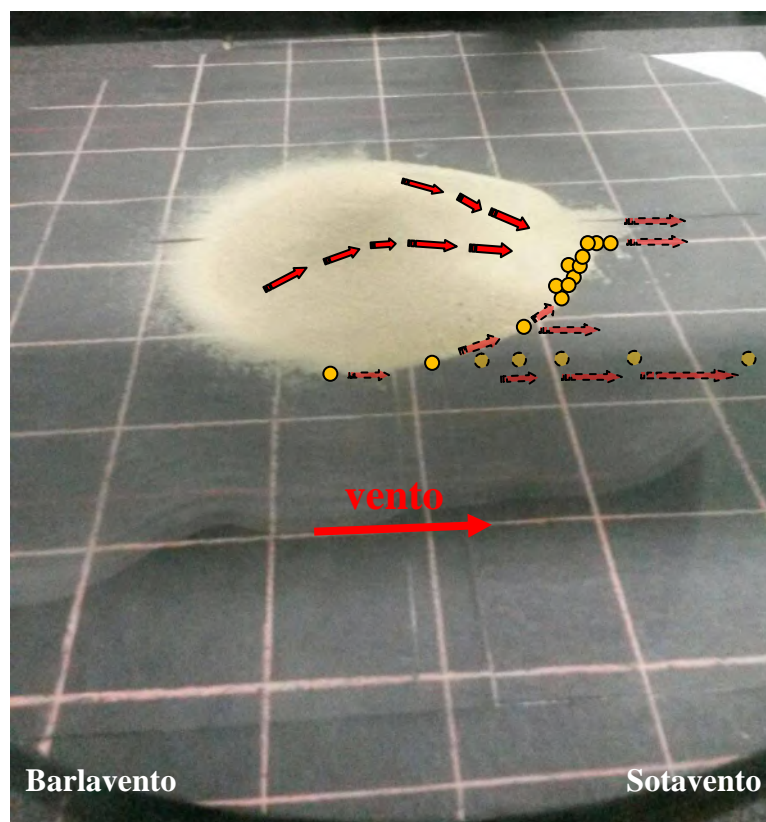


Figura 84. Foto e desenho esquemático do fluxo de vento e grãos no modelo em túnel de vento. Setas vermelhas marcam o fluxo de ar e círculos amarelos exemplificam a movimentação dos grãos de areia. Figuras pontilhadas marcam processos não confirmados, porém prováveis, ao longo do experimento. Foto da autora.

A partir das imagens mostradas acima, pode-se concluir que a evolução do cone de areia inicial ao longo do ensaio oficial deu origem a uma forma que não pode ser classificada como duna barcana. As diferenças nas áreas de erosão e deposição encontradas entre o modelo e as dunas reais exerceram um papel determinante na construção da forma. O modelo obtido ao final deste estudo necessita de mais horas de ensaio até que seja possível atingir uma forma final (estável).

14.3 Discussões e sugestões

Diversos fatores isolados, ou a combinação de um ou mais deles, pode explicar a configuração atingida na conclusão deste trabalho. Nisso consiste a complexidade dos modelos reduzidos. A simplificação dos sistemas reais e as mudanças de escala para realização dos estudos em laboratório são passíveis de muitos problemas. Abaixo são apresentados esses fatores e discutidas suas possíveis influências no projeto.

Primeiramente, a principal divergência entre o modelo aqui apresentado e os modelos desenvolvidos por Herrmann & Sauermann (2000) e Bagnold (1941) é a ausência de um aporte sedimentar no sistema do presente trabalho. O modelo matemático e computacional de Herrmann & Sauermann (*op. cit.*) leva em consideração uma entrada constante de areia vinda do limite de onde parte o vento simulado. Já o modelo em escala de Bagnold (*op. cit.*) adapta um sistema de liberação constante de areia, feito por um regulador mecanicamente controlado que libera o sedimento vindo de um reservatório, que se localiza diretamente na entrada de seu túnel de vento. Ambos os estudos obtiveram resultados positivos no que diz respeito à construção de uma duna barcana. Uma vez que as dunas barcanas necessitam da entrada de areia em seu sistema para que as mesmas não morram, assim como afirmado por Herrmann & Sauermann (*op. cit.*), seria ideal adaptar futuramente neste estudo um mecanismo que proporcionasse este aporte sedimentar.

Em segundo lugar, a simplificação do sistema natural, que é feita tanto neste modelo quanto em outros modelos em escala, pode dar origem a erros de imprecisão na replica. Fatores como as rajadas de vento naturais, que são tão determinantes nos campos de dunas barcanas, conforme Bierman e Montgomery (2015), não puderam ser reproduzidas em laboratório com o equipamento disponível com a configuração atual. Da mesma forma, determinados elementos, como a viscosidade cinemática e a densidade do fluido, não são passíveis de redução de escala, o que em teoria seria necessário para manter as proporções do sistema modelado.

Em seu livro, Bagnold (1941) afirma que após diversos testes em busca de desenvolver um túnel de vento satisfatório, chegou-se à conclusão de que condições estáveis de equilíbrio no fluxo de vento e areia não poderiam ser obtidas a menos que seu túnel de vento tivesse um comprimento de pelo menos 30 pés, ou aproximadamente 9 metros. Ainda segundo Bagnold, os experimentos por ele realizados mostraram diversas vezes a necessidade de aumentar o comprimento do túnel de vento em mais 20 pés (6 metros). Contudo, devido a efeitos acumulativos de escape de ar dentro do túnel, que são causados pela grande diferença de pressão dentro e fora da câmara de testes, o túnel necessitaria um redesign completo. Desta forma, Bagnold decidiu manter a medida de seu túnel de vento em 30 pés.

Levando em conta a experiência de Bagnold (*op. cit.*), talvez a formação de uma duna barcana em modelo possa vir a ser dependente do comprimento do túnel de vento utilizado.

Seria interessante poder avaliar futuramente a influência da existência de uma maior superfície para o desenvolvimento do vento na câmara de testes deste trabalho.

Não menos importante é levar em conta as condições naturais como a umidade do ambiente e do corpo da duna; a influência da pluviosidade, do lençol freático, do interduna úmido de água doce e das variações de salinidade que ocorrem no campo de dunas real, e não são possíveis de reproduzir com exatidão em laboratório até o momento.

Dunas naturais são formas governadas por processos complexos que completam uns aos outros e dão origem à sua beleza magnífica. A compreensão dos mecanismos que controlam a sua formação e deslocamento são de suma importância nos ramos da geomorfologia, geologia e conservação ambiental; até mesmo para que seja possível contornar os desastres naturais associados à migração de dunas. O presente estudo visou colaborar no conhecimento desse sistema natural tão complexo e, através de seu avanço junto a outros trabalhos, a ciência estará um pouco mais próxima de compreender os elementos-chave que governam os campos de dunas atuais, como o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, ou até mesmo os campos de dunas registrados no tempo geológico pelas rochas.

15 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Seminário Bacia de Barreirinhas - 11ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás.** Organizado por FERREIRA, M. A. 2013. Disponível em: http://www.brasilrounds.gov.br/arquivos/Seminarios_r11/tec_ambiental/Bacia_de_barreirinhas.pdf . Acesso em: 18 nov. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181:** solo/ análise granulométrica/ método de ensaio. Rio de Janeiro. 13p. 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6508:** solo/ grãos que passam na peneira de 4,8 mm/ determinação da massa específica/ método de ensaio. Rio de Janeiro. 13p. 1984b.

BAGNOLD, R.A. **The physics of blown sand and desert dunes.** 1. Ed. Londres: Chapman & Hall Ltd, 1941. 265 p.

BIERMAN, P.R; MONTGOMERY, D.R. **Key concepts in geomorphology.** 1 ed. Editora W. H. Freeman and Company Publishers, 2015. 494 p.

BUSCARIOLO, Filipe F. **Estudo de diferentes tipos de solo em túnel de vento através de simulação numérica.** 130 f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2009.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - São Luís SW/NW; Folhas SA. 23-V e SA. 23-Y, Estados do Pará e Maranhão - Escala 1:500.000;** organizado por Herbert Georges de Almeida. Brasília: CPRM, 2000.

ÇENGEL, Y. A. E CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações.** 3ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2015. 821 p.

FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia de Barreirinhas. Rio de Janeiro. **Bol. Geoci. PETROBRÁS**, v. 8, n. 1, p. 103-109.

GARCÍA, R. S. **Análise das condicionantes naturais e propriedades mecânicas de solos arenosos e sua influência na caracterização físico e geológica das dunas costeiras de**

Cabo Frio e Natal. 245 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

GASTÃO, F. G. C; MAIA, L. P. O uso de dados da Missão SRTM e sedimentológicos nos estudos de geomorfologia e padrões de drenagem na região dos Lençóis Maranhenses. **Revista Brasileira de Cartografia** (62/02): 1-114, 2010.

GONÇALVES, R. A. 1997. **Contribuição ao mapeamento geológico e geomorfológico dos depósitos eólicos da planície costeira do maranhão:** região de barreirinhas e rio novo - Lençóis Maranhenses - MA – Brasil. 235 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

GONÇALVES, R. A; LEHUGEUR, L. G. O; CASTRO, J. W. A; PEDROTO, A. E. S. Classificação das Feições Eólicas dos Lençóis Maranhenses, Maranhão, Brasil. **Mercator, Revista de Geografia da UFC**, 2(3): 99-112, 2003.

HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R; ALMEIDA, F. F. M; BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil.** 1. ed. Editora Beca, 2012. 900 p.

HERRMANN, H. J; SAUERMAN, G. The Shape of Dunes. **Physica A, Elsevier Science B. V.**, n. 283, p. 24–20, 2000.

HERRMANN, H. J; PARTELI, E. J. R; SCHWÄMMLE, V; MONTEIRO, L. H. U. e MAIA, L. P. 2006. **The coastal dunes of the Lençóis Maranhenses.** p. 11. Disponível em: <http://www.comphys.ethz.ch/hans/p/417.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTTÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, p. 92, 1992.

LEWIS E. L., R. G. PERK. The Practical Salinity Scale: conversion of existing data. **Deep Sea Research**, v. 28A, N° 4, p. 307-328. 1981.

MEDEIROS, Pedro H. C. **Estudo da influência da névoa salina na migração de dunas costeiras das regiões do Perú e dos Lençóis Maranhenses.** 69 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

Ministério do Meio Ambiente – MMA e Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. **Plano de Manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses**. São Luís, MA, p. 499. 2003.

MONTAGNE, B. 2009. **Aerodynamics in race cars explained**: aspects of race car aerodynamics, Ultimate Racing. Circle Track Magazine. 14 f. Disponível em: <http://hotrod.com/how-to/paint-body/ctrp-0908-aerodynamics-in-race-cars-explained/>.

MUEHE, D. O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: Guerra, A. J. T; Cunha, S. B. (Orgs.) Geomorfologia do Brasil. **Bertrand Brasil**, Rio de Janeiro, p. 273-349, 1998.

PAMPLONA, H. R. P. 1969. Litoestratigrafia da bacia cretácea de Barreirinhas. Rio de Janeiro. **Bol. Téc. PETROBRÁS**, v. 12, n. 3, p. 261-290.

REGALI, M.S.P; UESUGUI, N. & LIMA, E.C. 1985. Palinoestratigrafia e paleoambiente da Bacia de Barrerinhas, Maranhão, Brasil. In: **Congr. Bras. Paleont.**, 8. Rio de Janeiro, DNPM. Geol. 27, Paleont.Estrat. 2, p. 461-470.

SANTOS, J. H. S. **Lençóis Maranhenses atuais e pretéritos**: um tratamento espacial. 249 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 249, 2008.

SANTOS, J. H. S; XAVIER-DA-SILVA, J. 2009. Datação e evolução dos campos de dunas eólicas inativas dos Lençóis Maranhenses. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Viçosa - MG, SBGFA, p. 1-17 CD-ROM.

SANTOS, J. H. S; XAVIER-DA-SILVA, J. Caracterização e análise de situações ambientais relevantes no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses e áreas vizinhas. In: Guerra, A. J. T., Coelho, M. C. N. (Orgs.). **Bertrand Brasil**, Rio de Janeiro, p. 201-230, 2009.

SCHWÄMMLE, V; HERRMANN, H.J. Solitary behavior of sand dunes. **NATURE - Nature Publishing Group**, n. 426, p. 619-620, 2003.

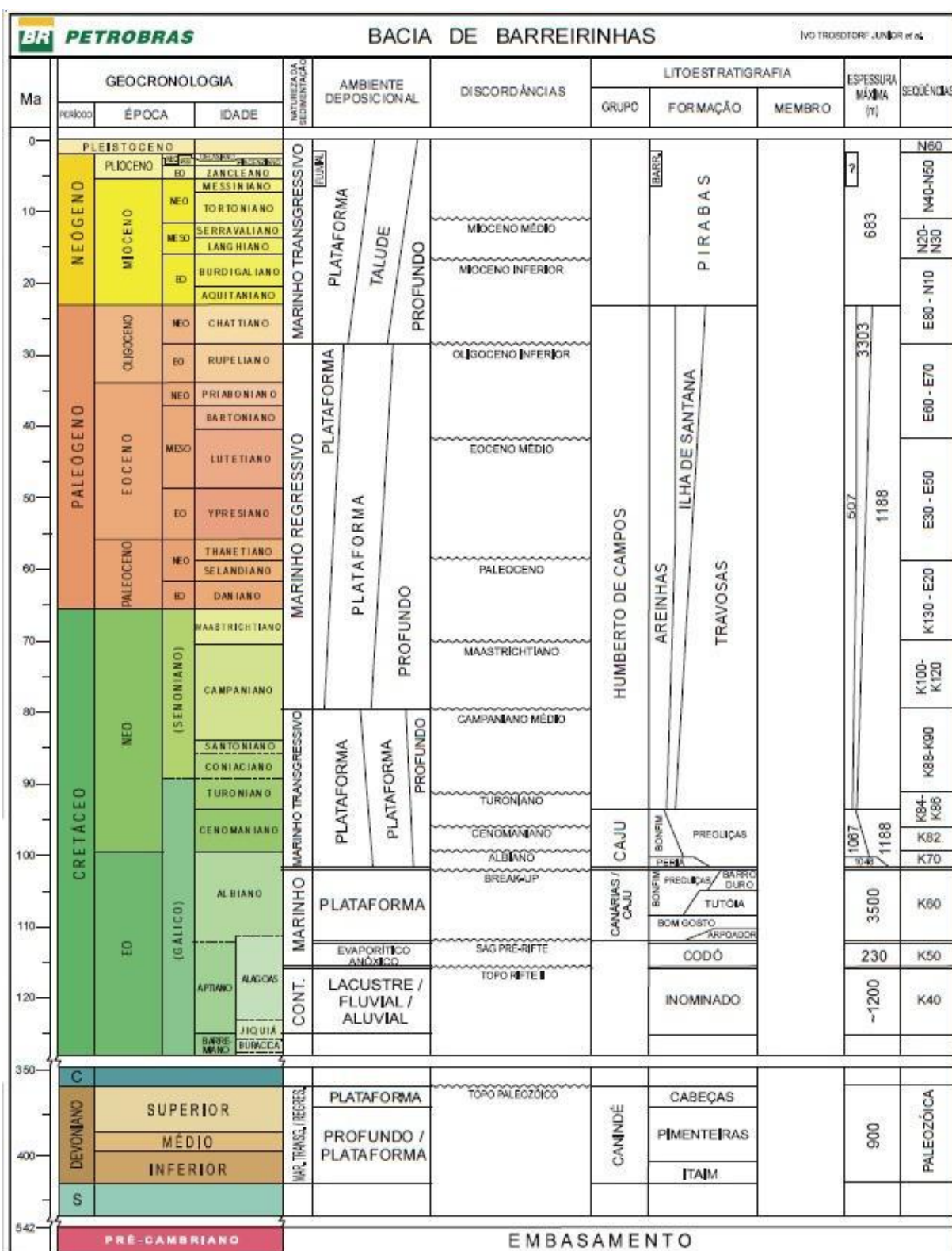
SOARES JR, A. V; HASUI, Y; COSTA, J. B. S; MACHADO, F. B. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem atlântica equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. **Geociências UNESP**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 669-692, 2011.

SUMMERFIELD, M. A. **Global geomorphology**: introduction to the study of landforms. 1. ed. Editora Pearson Education Limited, 1991. 524 p.

TROSDTORF JUNIOR, I; ZALÁN, P. V; FIGUEIREDO, J. .J. P. e SOARES, E. F. 2007. Bacia de Barreirinhas. Rio de Janeiro. **Bol. Geoci. PETROBRÁS**, v. 15, n. 2, p. 331 -339.

VIEIRA, B. C; SALGADO, A. A. R; SANTOS, L. J. C. **World geomorphological landscapes**: landscapes and landforms of Brasil. 1. ed. Editora Springer, 2015. 403 p.

ANEXO 1: Carta estratigráfica da Bacia de Barreirinhas, retirada de Trosdorf Junior *et al* (2007).



ANEXO 2: Coluna estratigráfica da Bacia de Barreirinhas. Figura retirada de Trosdorf Junior *et al.* 2007.

