

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PARÂMETROS MORFODINÂMICOS E SEDIMENTOLOGIA
DOS CAMPOS DE DUNAS EÓLICAS DA COSTA LESTE DO MARANHÃO

Natalia Naches Hilbert

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

Co-orientador: Carlos Conforti Ferreira Guedes

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-13/38)

SÃO PAULO
2013

Agradecimentos

Primeiramente, como não poderia deixar de ser, o meu agradecimento especial ao Prof, Giannini por ter me aceitado como sua orientada de iniciação científica, e posteriormente, sua orientada de Trabalho de Formatura. É um orgulho para mim ter trabalhado com o dedicado, atarefado e adorado Prof. Giannini. Agradeço a todos os ensinamentos que pela a sua forma única de ensiná-los, nunca serão esquecidos.

Meu agradecimento mais do que especial ao Carlos “Sfincter” Guedes por me acolher no seu projeto de doutorado e me ensinar tudo o que eu sei hoje sobre sedimentologia, minerais pesados, parâmetros morfoplanimétricos, dunas e até ArcGIS.

Agradeço a Elaine e a Jordana pela grande ajuda nas intermináveis horas gastas nos laboratórios de sedimentologia e petrografia.

Agradeço aos meus amigos que nesses cinco anos me proporcionaram grandes momentos e amizades verdadeiras, o jeito único de cada um de vocês, me transformou como pessoa.

E por fim, o meu agradecimento a minha família e ao meu namorado pela compreensão e paciência durante toda essa trajetória.

RESUMO

Os campos de dunas de Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis, Tutoia e Ilha do Caju foram estudados quanto a distribuição espacial de parâmetros morfoplanimétricos (comprimento de crista e distância entre cristas). Para os dois primeiros campos, avaliou-se também a distribuição de características sedimentológicas (granulometria e minerais pesados). Os dois parâmetros morfoplanimétricos não variaram de modo estatisticamente consistente ao longo dos perfis longitudinais ao vento efetivo, mas sim entre perfis. A ausência de padrão longitudinal bem definido foi atribuída a pelo menos dois fatores, conjugados ou isolados. O primeiro é o fato de os campos de dunas estudados não terem atingido sua maturidade morfodinâmica e o segundo está ligado à possibilidade de estes campos de dunas não possuírem geometria de área fonte linear, mas sim plana, o que determinaria parâmetros morfoplanimétricos constantes ao longo da direção de transporte eólico.

Quanto a sedimentologia, o tamanho médio de grão, variável entre areia média e areia fina, ora apresenta constância ao longo do campo de dunas, ora tendência de engrossamento para o interior. Nos Lençóis Maranhenses, o aumento dos minerais pesados relativamente menos densos rumo à costa pode ser atribuído ao retrabalhamento e à seleção hidráulica pela ação dos rios que cortam o campo de dunas. Já nos Pequenos Lençóis, o padrão é o inverso, o que também pode ser atribuído ao transporte seletivo quanto a densidade, só que agora pela ação do vento.

ABSTRACT

The Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis, Tutoia e Ilha do Caju dune fields were studied regarding the spatial distribution of morphoplanimetric parameters (crest length and dune spacing). The first two dune fields were also evaluated as the spatial distribution of sedimentological characteristics (grain size and heavy minerals). The two morphoplanimetric parameters did not show a statistically consistent variability along profiles parallel to the effective wind, only among successive parallel profiles. The lack of well defined pattern in the longitudinal profiles was assigned to at least two combined or isolated factors. The first one is the fact that the studied dune fields have not yet reached morphodynamic maturity and the second factor is related to the possibility of these dune fields do not have linear source area geometry, but plane geometry, which determine constant morphoplanimetric parameters along the direction of eolian transport.

Regarding the sedimentology, the mean grain size ranged between medium and fine sand. This granulometric parameter is sometimes constant over dune fields and sometimes show a coarsening trend to inland. In Lençóis Maranhenses dune field, the increase of less dense heavy minerals towards the coast can be attributed to the reworking and hydraulic selection of eolian sands by the rivers that cross the dune field. In the Pequenos Lencóis dune field, the pattern is the reverse and the preferential selective transport of lighter minerals must be attributed to the wind.

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de localização dos campos de dunas ativos propostos como área de estudo, destacados nas caixas de texto brancas. As caixas em roxo indicam as cidades. Imagem de satélite Landsat (ano 2000). Fonte: https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/ .	1
Figura 2. Representação esquemática dos parâmetros morfoplanimétricos espaçamento, comprimento de crista, orientação e defeitos (quebras no padrão da duna ou nas suas terminações), com seus respectivos critérios de medição, em dois tipos de dunas eólicas: barcanoides e lineares transversais. Modificado de Ewing <i>et al.</i> (2006).	8
Figura 3. Localização das amostras submetidas a análise sedimentológica, coletadas nos campos de dunas de Lençóis Maranhenses (Lma), Pequenos Lençóis (Plm) e rio Preguiças (Pre), Estado do Maranhão.	12
Figura 4. Localização de pontos de amostragem de praias e dunas eólicas ativas na costa do Piauí. O objetivo desta coleta foi avaliar a influência, no aporte sedimentar para os campos de dunas do Maranhão, da deriva longitudinal rumo oeste, independente do aporte do rio Parnaíba.	12
Figura 5. Exemplo de resultado do ensaio granulométrico a difração de laser (amostra LMA - 15), com distribuição em volume agrupada em classes de 0,5 phi e estatísticas calculadas para intervalos de 0,125 phi.	14
Figura 6. Aspectos de campo dos Pequenos Lençóis Maranhenses: A. Dunas avançando por sobre mangue às margens do rio Preguiças. B. Campo de <i>nebkhas</i> , na planície deflacionar do campo de dunas. C. Depósitos de mangue aflorando na praia de Caburé.	16
Figura 7. Aspectos de campo dos Lençóis Maranhenses. A. Dunas barcanas com depressões interdunas alagadas. B. Dunas barcanas com vegetação e retrocordões. C. Dunas separadas da praia por uma planície composta de lençóis de areia e áreas alagadas com eventual deposição de material argiloso. D. As planícies deflacionárias no interior do campo de dunas (falhas de cobertura) são compostas por rastros lineares residuais, retrocordões e áreas alagadas.	17
Figura 8. Características do ponto LM – 58, localizado na parte leste do campo de dunas de Luís Correia. A. Duna barcana de altura métrica, em meio a planície interdunas coberta por ôndulas. Notar crescimento de gramíneas na planície imediatamente a sotavento da barcana. B Face de avalanche de duna barcana, marcada por línguas de grainflow, e pedestal de baixo mergulho (<i>plinth</i>), coberto por ôndulas formadas por ventos secundários. C. Concentração de grânulos, inclusive bioclastos carbonáticos, na zona deflacionária da planície interdunas. Notar cordões de grânulos nas cristas das ôndulas eólicas. Ponto LM - 58, parte leste do campo de dunas de Luís Correia.	18
Figura 9. Aspectos do ponto LM – 59, lençol de areia de cerca de 200 m da praia de Macapá. A. Praia de Macapá – PI, intermediária reflexiva, com cúspides de arco decamétrico na face de praia. B. <i>Nebkha</i> em forma semi-pirâmida, típica de duna de sombra (<i>shadow dune</i>). Vento efetivo voltado para o canto superior direito da foto à direita (SW).	19
Figura 10. Praia do Coqueiro, em Luís Correia – PI, intermediária de baixa energia. Ponto LM – 61.	19
Figura 11. Quatro perfis (linhas em rosa 1 a 4, orientadas de SW para NE) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing <i>et al.</i> (2006) no campo de dunas de Lençóis Maranhenses. Linhas finas vermelhas correspondem às cristas de dunas mapeadas.	20
Figura 12. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis analisados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,126, com erro I de 0,3 ou 30%; r_2 -0,476, com erro I de 0,000 ou 0 %; r_3 -0,207, com erro I de 0,079 ou 7,9%; r_4 0,184, com erro I de 0,163 ou 16,3%.	21
Figura 13. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis analisados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,073, com erro I de 0,423 ou 42,3%; r_2 0,019, com erro I de 0,845 ou 84,5%; r_3 0,098, com erro I de 0,394 ou 39,4%; r_4 0,235, com erro I de 0,071 ou 7,1%.	21
Figura 14. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) dos valores da distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Lençóis Maranhenses. Notar aumento dos valores médios e, grosso modo, do intervalo interquartis, de SE (perfil 1) para NW (perfil 4).	22
Figura 15. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) dos valores de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas eólicas dos Lençóis Maranhenses. Notar diminuição dos valores médios e do segundo quartil de SE (perfil 1) para NW (perfil 4).	22
Figura 16. Três perfis (linhas em rosa 1 a 3, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing <i>et al.</i> (2006) no campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses.	23
Figura 17. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,126, com erro I de 0,403 ou 40,3%; r_2 0,383, com erro I de 0,071 ou 7,1 %; e r_3 0,147, com erro I de 0,814 ou 81,4 %.	24
Figura 18. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Pequenos Lençóis Maranhenses, retirando a zona deflacionária que se encontra nos perfis 1 e 2.	24
Figura 19. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,004, com erro I de 0,979 ou 97,9%; r_2 -0,045, com erro I de 0,822 ou 82,2 %; r_3 -0,054, com erro I de 0,874 ou 87,4 %.	25
Figura 20. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Notar aumento da mediana e do intervalo interquartis do perfil 1 (SE) para o 3 (NW).	25

Figura 21. Três perfis (linhas em rosa 1 a 3, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing <i>et al.</i> (2006) no campo de dunas de Tutoia.	26
Figura 22. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 - 0,387, com erro I de 0,172 ou 17,2 %; r_2 0,113, com erro I de 0,790 ou 79,0 %; e r_3 0,425, com erro I de 0,024 ou 2,4 %.	27
Figura 23. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,107, com erro I de 0,704 ou 70,4 %; r_2 0,065, com erro I de 0,841 ou 84,1 %; e r_3 0,425, com erro I de 0,021 ou 2,1 %.	27
Figura 24. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Notar queda da mediana e do quartil superior do perfil 1 para o perfil 3.	28
Figura 25. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Notar queda da mediana e do intervalo interquartis do perfil 1 para o 3.	28
Figura 26. Dois perfis (linhas em rosa 1 a 2, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing <i>et al.</i> (2006) no campo de dunas da Ilha do Caju.	29
Figura 27. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 - 0,007, com erro I de 0,951 ou 95,1 %; e r_2 de 0,074, com erro I de 0,786 ou 78,6 %.	30
Figura 28. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,582, com erro I de 0,000 ou 0,00 %; e r_2 -0,363, com erro I de 0,152 ou 15,2 %.	30
Figura 29. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de distância entre cristas para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju.	31
Figura 30. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) de comprimento de crista para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju.	31
Figura 31. Fotomicrografias de grãos de zircão, mineral pesado mais comum nos sedimento estudados. Notar grande diversidade de formas, desde euédrica prismática bipiramidada (à esquerda) até anédrica arredondada, ovoide (imagem central da linha superior).	35
Figura 32. Fotomicrografias de grãos de rutilo, nas suas formas mais comumente encontradas. Notar geminações em cotovelo e polissintéticas.	36
Figura 33. Fotomicrografias de hornblenda, nas diversas formas observadas em lâmina. Notar predomínio de formas subédricas prismáticas ou lamelares.	36
Figura 34. Fotomicrografias de grãos de turmalina, Notar pouca variação de cor e domínio de formas subédricas prismáticas, subarredondadas. Grão subcircular, no centro, corresponde à seção basal.	37
Figura 35. Sillimanita, nas formas mais comumente observadas nos sedimentos estudados. Notar variedade fibrosa (agregados de cristais aciculares), nas duas imagens da direita.	37
Figura 36. Cianita, nas formas mais comuns nos sedimentos analisados.	38
Figura 37. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) com todos os valores de distância intercristas para os campos de dunas eólicos de Ilha do Caju, Tutoia, Pequenos Lençóis (PLM) e Lençóis Maranhenses (LM).	41
Figura 38. Gráfico em caixas (<i>boxplot</i>) com todos os valores de comprimento de crista dos campos de dunas eólicos de Ilha do Caju, Tutoia, Pequenos Lençóis (PLM) e Lençóis Maranhenses (LM). Notar tendência para maiores valores em LM.	42
Figura 39. Valores de diâmetro médio (ϕ) interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.	43
Figura 40. Valores de desvio padrão da distribuição granulométrica interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.	43
Figura 41. Valores de assimetria da distribuição granulométrica interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.	44
Figura 42. Variação espacial da assembleia quantitativa de minerais pesados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Todos os pontos representados são de depósitos eólicos, exceto LMA - 11, que é praia.	45
Figura 43. Gráfico de barras mostrando os principais minerais pesados presentes nas amostras do perfil 1 dos Lençóis Maranhenses, da porção mais proximal (amostra LMA-1) para a mais distal do campo de dunas (LMA-4). Notar que os valores dos minerais pesados de menor densidade e, portanto, menor equivalente hidráulico, como turmalina, sillimanita, estaurolita, epídoto e cianita, diminuem para o interior do campo de dunas (de LMA-1 para LMA-4, SE para NW), enquanto os de maior densidade e equivalente hidráulico, como zircão e rutilo, aumentam.	45
Figura 44. Figura exemplificando o mecanismo de retrabalhamento sedimentar exercido pela drenagem que atravessa o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os sedimentos carregados rumo SW pelo vento são levados pelos rios de volta à praia e daí transportados novamente pelo vento para o interior do campo de dunas. Orientação das setas rumo à costa desenhada de acordo com a direção aproximada dos rios principais cortando o campo de dunas.	46
Figura 45. Variação espacial da assembleia quantitativa de minerais pesados no campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses e no rio Preguiças. Aumento relativo rumo ao interior de componentes de menor equivalente hidráulico ("pesados leves"), em detrimento dos de maior ("pesados pesados"), pode ser atribuído à seleção aerodinâmica.	47
Figura 46. Gráficos representam o perfil 1 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.	48

Figura 47. Gráficos representam o perfil 3 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zirção com a distância da praia.	48
Figura 48. Gráficos representam o perfil 4 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zirção com a distância da praia.	49
Figura 49. Gráficos representam o perfil 2 do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zirção com a distância da praia.	49
Figura 50. Gráficos representam o perfil 3 do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zirção com a distância da praia.	50

Índice de Tabelas

Tabela 1. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, das amostras dos Lençóis Maranhenses.	32
Tabela 2. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, das amostras dos Pequenos Lençóis Maranhenses.	33
Tabela 3. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, da amostra retirada no médio curso do rio Preguiças.	33
Tabela 4. Resultados de ensaios de separação de minerais leves e pesados na classe granulométrica areia muito fina, por flutuação-afundamento em líquido denso, e de minerais magnéticos da fração pesada, por atração ao ímã portátil.	34
Tabela 5. Resultados da quantificação de minerais pesados de cada amostra, em valores percentuais de contagem ao microscópio petrográfico.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. METAS E OBJETIVOS	2
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	2
3.1 DINÂMICA DE SISTEMAS EÓLICOS COSTEIROS.....	2
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE DEPÓSITOS EÓLICOS COSTEIROS	3
3.3 ÁREA DE ESTUDO.....	5
3.4 PADRÕES EVOLUTIVOS DE DUNAS	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	10
4.2 SENSORIAMENTO REMOTO	10
4.3 ATIVIDADES DE CAMPO.....	10
4.4 ATIVIDADES DE LABORATÓRIO.....	13
4.5 TRATAMENTO GRÁFICO-ESTATÍSTICO DOS DADOS	15
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	15
5.1 TRABALHO DE CAMPO	15
5.1.1 <i>Primeira campanha</i>	15
5.1.2 <i>Segunda campanha</i>	17
5.1.2.1 LM - 58.....	17
5.1.2.2 LM - 59.....	18
5.1.2.3 LM - 61.....	19
5.2 SENSORIAMENTO REMOTO	19
5.2.1 <i>Lençóis Maranhenses</i>	19
5.2.2 <i>Pequenos Lençóis Maranhenses</i>	23
5.2.3 <i>Tutoia</i>	26
5.2.4 <i>Ilha do Caju</i>	29
5.3 SEDIMENTOLOGIA	32
5.4 MINERAIS PESADOS	35
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	40
6.1 SENSORIAMENTO REMOTO	40
6.2 SEDIMENTOLOGIA	42
6.3 MINERAIS PESADOS	44
6.4 INTEGRAÇÃO E DISCUSSÃO FINAL DOS DIFERENTES TIPOS DE RESULTADOS	47
7. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

A porção leste da costa maranhense, entre a baía de São José e a foz do rio Parnaíba, caracteriza-se pela presença de grandes campos de dunas ativas, como Ponta da Gaivota, Tutoia e os dois maiores do Brasil, Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis, os quais, juntos, totalizam superfície de mais de 1200 km² (Figura 1). Apesar dessa sua grande expressão em área e da importância turística e ambiental, reconhecida parcialmente através da criação, em 1981, do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, estes campos de dunas ativas permanecem muito pouco conhecidos no que se refere a sua dinâmica sedimentar, sedimentologia e estratigrafia, exceto pelos trabalhos de Gonçalves *et al.* (2002, 2003), Santos (2008) e Hesp *et al.* (2009) nos Lençóis Maranhenses. Com o propósito de contribuir para o preenchimento desta lacuna de conhecimento, a proposta do presente trabalho de formatura é caracterizar, de modo integrado, a morfologia e a sedimentologia dos campos de dunas da costa leste do Maranhão, como subsídio para a compreensão de sua dinâmica, dispersão e proveniência sedimentar.

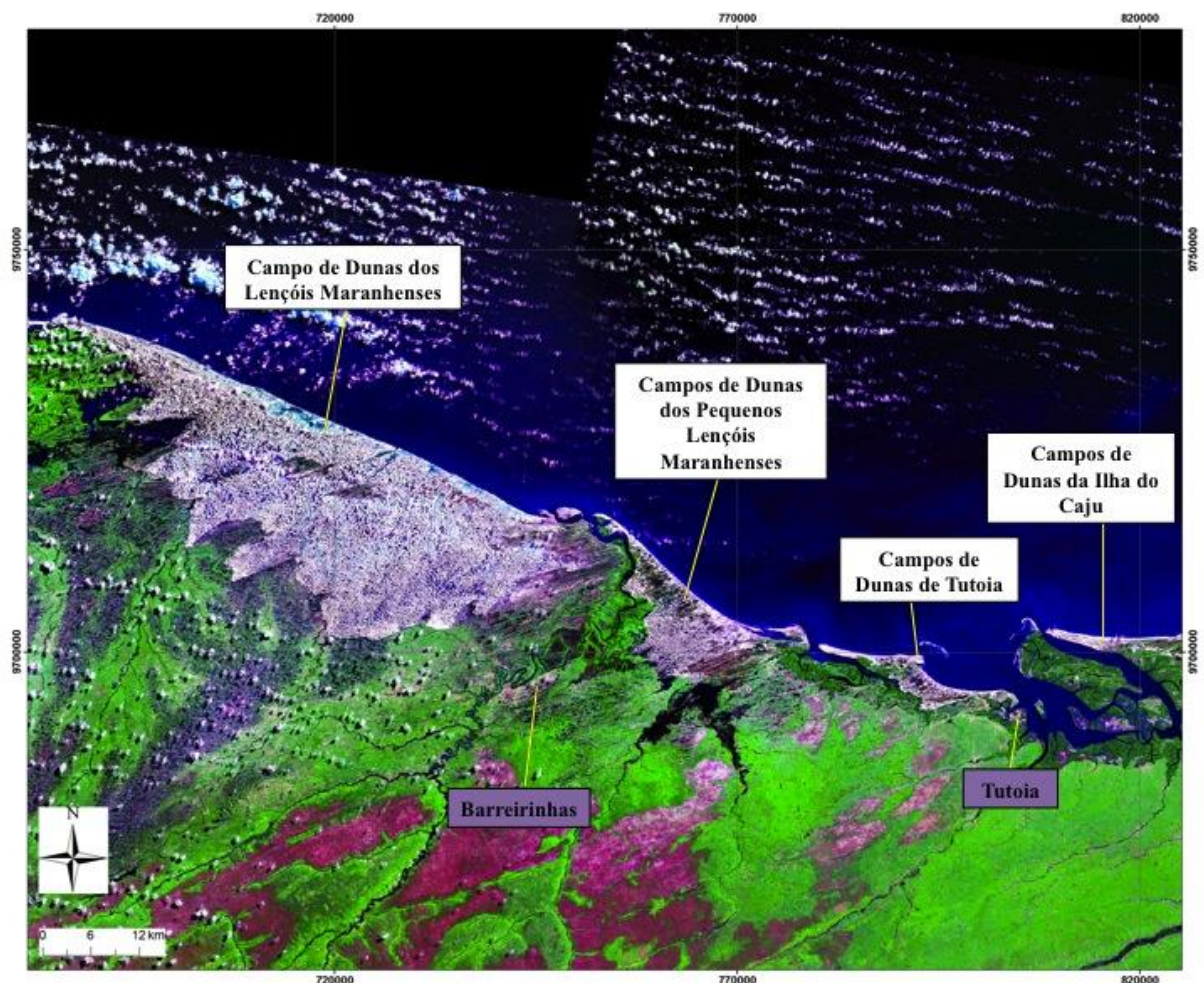


Figura 1. Mapa de localização dos campos de dunas ativos propostos como área de estudo, destacados nas caixas de texto brancas. As caixas em roxo indicam as cidades. Imagem de satélite Landsat (ano 2000). Fonte: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>.

2. METAS E OBJETIVOS

A meta maior deste trabalho é obter um modelo de distribuição espacial de feições morfológicas e propriedades sedimentológicas nos campos de dunas ativos do leste do Maranhão (Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis, Tutoia e Ponta da Gaivota) e relacioná-lo com aporte sedimentar (áreas fontes e volumes de areia fornecidos) e grau de transporte (distância da fonte e retrabalhamento). Para buscar esta meta, propõem-se como objetivos: elaborar uma pesquisa bibliográfica sobre os modelos mais aceitos de gênese e classificação de depósitos eólicos costeiros; reconhecer, classificar e mapear, com base em dados de sensoriamento remoto e de campo, os diferentes tipos de feições eólicas existentes nos campos de dunas estudados; fazer a caracterização sedimentológica (quanto a granulometria e minerais pesados) tanto das várias feições eólicas como das praias que atuam como fonte imediata aos campos de dunas ativos; e integrar os resultados de variação espacial de morfologia e sedimentologia, de modo a caracterizar o padrão de dispersão sedimentar através do sistema eólico em questão.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1 Dinâmica de sistemas eólicos costeiros

O surgimento e manutenção de campos de dunas eólicas dependem da existência de saldo influxo-efluxo (*sensu* Kocurek & Havholm 1993) positivo, representado pelo acúmulo de dado volume de sedimentos eólicos em um espaço de estocagem sedimentar (ou “espaço de acumulação eólica”, na nomenclatura daqueles autores). Para campos de dunas costeiros, as variáveis do macroambiente que controlam de modo mediato o saldo influxo-efluxo, de acordo com Giannini (2007) e Giannini *et al.* (2011), são nível relativo do mar (NRM), clima e fisiografia da plataforma. Em caráter mais imediato, portanto mais local e de curto prazo, destacam-se ainda, segundo mesmos autores, fatores como morfodinâmica praial, deriva litorânea, vegetação, ação de tempestades e chegada de rios.

O NRM reflete a eustasia e a subsidência. Controla o nível do lençol freático e, deste modo, os espaços de acumulação e de preservação sedimentar (Kocurek & Havholm 1993). Todas as demais variáveis mencionadas estão de algum modo relacionadas ao volume de sedimento disponível para o transporte eólico e à deriva eólica potencial e efetiva (Giannini *et al.* 2005, Giannini 2007).

A área fonte para sistemas eólicos costeiros é a praia, mais especificamente a porção de areia inconsolidada e sem vegetação da zona intermarés. A extensão da zona intermarés e, portanto da área fonte, é resultado da amplitude de maré e da morfodinâmica praial, a qual, por sua vez, depende de fatores como fisiografia da plataforma interna, deriva litorânea, granulação dos sedimentos e regime de ondas (Wright *et al.* 1979, Short & Hesp 1984). Mas o sistema pode ainda contar com fontes internas, sejam suas próprias areias

sejam as de seu substrato (Short 1988, Giannini 2007). O clima e o regime eólico (frequência de atuação, velocidade e variabilidade direcional dos ventos) definem a deriva eólica potencial (Bagnold 1941, Goldsmith 1978, Fryberger 1979, White 1979, Sarre 1988). A deriva eólica efetiva reflete a interação da deriva potencial com a quantidade de sedimentos disponíveis, esta controlada local ou regionalmente pelo aporte fluvial e pela deriva litorânea longitudinal (Giannini *et al.* 2005). Tem correspondência com o conceito de influxo eólico, de Kocurek & Havholm (1993).

3.2 Classificação de depósitos eólicos costeiros

A classificação de depósitos eólicos direcionada especificamente para contextos costeiros, e baseada sobretudo em critérios morfológicos e de cobertura vegetal, atravessa fase de grande incremento desde a década de 1980 (Short & Hesp, 1982; Hesp, 1983, 1988).

De acordo com Hesp (2000), os depósitos eólicos costeiros podem ser classificados em quatro grandes tipos: dunas frontais, rupturas de deflação (*blowouts*), dunas parabólicas e campos de dunas transgressivos. A estes quatro tipos, pode-se acrescentar ainda um quinto, os lençóis de areia (*sand sheets*) (Giannini *et al.* 2005).

Dunas frontais (*foredunes*) são depósitos formados no pós-praia (Hesp 1983, 1988, 2000) ou mesmo na antepraia superior (Giannini *et al.* 2005, Martinho *et al.* 2006), como resultado da retenção de areia costeira pela vegetação pioneira. Podem passar de incipientes a estabelecidas (Hesp 1983, 1988), com o aumento relativo de altura, complexidade morfológica e diversidade de cobertura vegetal (Hesp 2000, Giannini 2007). As dunas frontais incipientes podem ser ainda morfológicamente categorizadas em cordões, terraços ou rampas (Hesp 2000). Já as dunas frontais estabelecidas, segundo Hesp (1988), podem ser subdivididas em cinco estágios, 1 a 5, em ordem de erosão crescente.

Rupturas de deflação (*blowouts*) são feições mistas (erosivo-deposicionais), geradas por retirada, via deflação e redeposição local pelo vento, de depósitos arenosos preexistentes, como dunas frontais ou cristas praias (Giannini *et al.* 2005). A ruptura faz-se através da produção de bacia deflacionária, delimitada por paredes erosivas sub-paralelas que se fecham, rumo sotavento, em lobos deposicionais em forma de U, contendo faces de avalanche ou *slipfaces* (Hesp 2000, Martinho *et al.* 2003, 2006).

Dunas parabólicas, termo introduzido por Steenstrup (1894 *apud* Howell 1960), são caracterizadas por apresentar geometria em planta em U ou V, com convexidade voltada para sotavento. São compostas basicamente pelos mesmos elementos da ruptura de deflação, da qual diferem pelo maior alongamento das paredes, em forma de rastro linear residual (*trailing ridge*). Sua formação está ligada portanto à evolução, por migração, das próprias rupturas deflacionares.

Campos de dunas livres correspondem a depósitos de areia eólica de grande escala (hectométrica ou maior), em movimento rumo ao interior ou, mais raramente, subparalelo à costa (Giannini *et al.* 2005, Martinho *et al.* 2006). Os campos de dunas que se movem ao interior transversalmente à costa são designados campos de dunas transgressivos (*transgressive dune fields*), termo introduzido por Gardner (1955). Os campos de dunas livres brasileiros contêm, invariavelmente, cordões de precipitação (ver definição no Quadro 1) e/ou dunas de orientação transversal ao vento efetivo, com crista linear, em meia lua (barcanas) ou sinuosa (barcanoides) (Giannini *et al.* 2005, Giannini 2007).

Lençóis de areia (*sandsheets*) são massas de areia eólica em movimento com pouco relevo, isto é, sem superimposição de dunas com faces de avalanche (Kocurek & Nielson, 1986). Em áreas com elevada relação entre energia eólica e suprimento ou com trânsito rápido de sedimentos, lençóis de areia podem desenvolver-se no lugar de campos de dunas livres (Tomazelli 1990, Giannini 2007).

Os cinco grandes tipos de depósitos eólicos descritos têm caráter abrangente, e são, portanto, bastante úteis em enfoques mais generalistas. Abordagens mais detalhadas, inspiradas em exemplos brasileiros, e baseadas no grau de influência morfodinâmica da vegetação, foram propostas por Giannini *et al.* (2005, 2011), Martinho *et al.* (2006) e Giannini (2007). Estas propostas, adotadas neste projeto, abrangem várias outras classes de depósitos. Entre aquelas com influência morfodinâmica da vegetação, destacam-se: rastros lineares residuais, retrocordões, *nebkhas*, planícies interdunas, montes residuais e planícies de deflação (Quadro 1), além das já mencionadas dunas frontais, rupturas de deflação e dunas parabólicas.

Quadro 1. Definições para feições eólicas costeiras formadas sob influência morfodinâmica da vegetação, segundo Giannini *et al.* (2005), Martinho *et al.* (2006) e Giannini (2007). Outras feições desta mesma categoria são dunas frontais, rupturas de deflação e dunas parabólicas (definidas no texto).

Feição eólica	Termo usual na literatura internacional	Definição
Rastros lineares residuais	<i>Trailing ridges</i>	Cordões resultantes da fixação, por vegetação, de braços alongados de dunas parabólicas, ou das terminações de dunas barcanas e cadeias barcanoides parabolizadas, deixados para trás à medida que as dunas migram
Retrocordões (ou marcas de migração dunar)	<i>Gegenwallen, residual dune ridges</i>	Cordões depositados por ventos reversos, em meio a vegetação da planície deflacionária, na margem barlavento de campos de dunas livres, com sazonalidade controlada pela umidade da areia
<i>Nebkhas</i>	<i>Nebkhas</i>	Montículos de areia depositados em meio a vegetação
Planícies interdunas	<i>Interdune plains</i>	Áreas aproximadamente planas situadas entre dunas transversais ou barcanoides, onde a deflação predomina sobre a deposição eólica e onde processos deposicionais não eólicos são tão ou mais atuantes que os eólicos
Montes residuais	<i>Remnant knobs</i>	Morrotes, em meio a campos de dunas, remanescentes da erosão de um depósito eólico, geralmente antigos cordões de precipitação
Cordões de precipitação	<i>Precipitation ridges</i>	Depósitos de forma cônica e alongada localizados ao longo das margens laterais e, às vezes, frontais, dos campos de dunas livres.

Entre os elementos morfológicos sem influência significativa da vegetação, incluem-se, segundo os mesmos autores: franjas de areia eólica, protodunas, dunas transversais, cadeias barcanoides, extensões lineares, depressões interdunas e lobos deposicionais (Quadro 2).

Quadro 2. Definições para feições eólicas costeiras formadas sem influência morfodinâmica relevante da vegetação, segundo Giannini *et al.* (2005), Martinho *et al.* (2006) e Giannini (2007).

Feição eólica	Termo usual na literatura internacional	Definição
Franjas de areia eólica	-----	Sedimentos incoesos depositados pelo vento, sob a forma de lençol ou rampa de espessura até decimétrica, aos pés das dunas frontais ou escarpas costeiras
Protodunas	<i>Protodunes</i>	Formas de leito eólicas dômicas ou alongadas com orientação transversal ao vento efetivo, com até poucos metros de altura e sem face de avalanche
Dunas transversais	<i>Transverse dunes</i>	Megaformas de leito com crista linear aproximadamente retilínea, de orientação mais ou menos perpendicular ao vento efetivo
Cadeias barcanoides	<i>Barchanoid chains, crescentic dunes</i>	Conjuntos de dunas barcanas lateralmente coalescidas, com crista sinuosa transversal ao vento efetivo
Extensões lineares	<i>Lineal extensions</i>	Depósitos eólicos de crista linear, orientados subparalelamente ao vento efetivo, anexados à porção côncava e mais alta da cadeia barcanoide
Depressões interdunas	<i>Interdune depressions</i>	Zonas de perfil ligeiramente côncavo para cima, situadas entre o costado de uma duna e a frente da duna à retaguarda
Lobos deposicionais	<i>Depositional lobes</i>	Frentes de avanço principais dos campos de dunas, com formato parabólico, que migram, sobre terreno vegetado ou rochoso, no rumo do vento efetivo

3.3 Área de estudo

O clima da região leste maranhense classifica-se como quente subúmido tropical de zona equatorial, com temperatura média anual de 27°C, caracterizado por período seco com quatro a seis meses de duração e por período úmido marcado por chuvas torrenciais (IBGE, 1977). A estação chuvosa concentra-se no primeiro semestre e relaciona-se à presença, sobre a região, da Zona de Convergência Inter-Tropical (ZCIT). Já a estação seca, no segundo semestre, ocorre quando a ZCIT posiciona-se mais a norte da área de estudo.

A amplitude de maré diária no porto de Tutoia, segundo a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), varia entre 3,3 m, na sizígia, e 1,2 m, na quadratura. Os ventos predominantes, medidos nas estações São Luís (MA) e Luís Corrêa (PI), de 1951 a 1972, são de E e NE, com velocidades médias de 3,6 a 8,2 m/s (Sawakuchi 2006). De acordo com Bittencourt *et al.* (2005), existe grande predomínio de ondulações (*swell waves*) de E e NE, o que resulta em deriva litorânea longitudinal com rumo geral oeste. Segundo Pianca *et al.* (2010), as alturas das ondas na região apresentam pouca variação entre as estações de inverno e de verão, com altura média de 2,1 m e 1,9 m, respectivamente. A deriva para oeste é responsável pelo retrabalhamento dos sedimentos oriundos dos rios Parnaíba, Preguiça e Novo/Cangatá. Conforme interpretado por Giannini (2007), tanto o rio Preguiça quanto o rio Novo/Cangatá, por retrabalharem sedimentos de campos de dunas ativos,

forneceriam mais sedimento que a capacidade de transporte da deriva litorânea longitudinal. Esse excesso de sedimentos perto da foz dos rios torna-se disponível para o retrabalhamento eólico e imprime, segundo o autor, uma característica peculiar dos campos de dunas de Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis: a assimetria espacial, com maior desenvolvimento da deposição na porção leste (barlamar) de cada campo de dunas.

Não existem curvas de variação de NRM holocênico específicas para o Estado do Maranhão. As curvas disponíveis para o Holoceno do Brasil compreendem até o Estado do Rio Grande do Norte (Angulo *et al.* 2006, Caldas *et al.* 2006). Para a Região Nordeste do país, Angulo *et al.* (2006), em análise crítica de todos os indicadores disponíveis na literatura, indicam suave declínio de NRM após o nível máximo holocênico de 3 a 4 m, alcançado entre 7000 e 5000 anos cal AP. Entretanto, a extrapolação desse padrão para a área de estudo é de certa forma prematura, dada a falta de evidências de paleoníveis ou mesmo de estudos específicos sobre o tema na região.

Estudos sobre o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses, com ênfase à classificação das feições eólicas observadas na região, foram realizados por Gonçalves (1997), Gonçalves *et al.* (2002, 2003), Santos *et al.* (2005) e Santos (2008). Gonçalves (1997) dividiu o campo de dunas em quatro compartimentos, sendo que somente o último compartimento refere-se a dunas atuais. O primeiro compartimento corresponde ao que ele denominou de Domínio das Formas Transversais, o qual engloba a porção extremo sul da área de estudo. As formas superficiais presentes foram agrupadas em: zonas das formas transversais preservadas, zonas das formas transversais pouco preservadas e zona de formas irregulares ou mistas.

O segundo compartimento equivale ao Domínio de Formas de Dunas Fixas e Vegetadas, posicionada adjacente e a norte do primeiro compartimento. As formas nesse compartimento estão representadas, na descrição do autor, por dunas parabólicas, dunas hemi-parabólicas (dunas com apenas um braço desenvolvido), “cadeias parabólicas” e cadeias barcanas ou barcanoides. O Domínio das Grandes Superfícies de Truncamento representa o terceiro compartimento geomorfológico, segundo Gonçalves (1997). Tal domínio inclui grandes superfícies de truncamento vegetadas em áreas topograficamente mais baixas do que as anteriores. As cotas variam de 65 m, no extremo sudeste da área, até 4 m no limite norte. A distribuição das feições eólicas neste domínio foi dividida pelo autor em duas zonas: a primeira corresponde a áreas onde as marcas de dunas (retrocordões) e cordões longitudinais foram total ou parcialmente destruídos por processos erosivos. Já na segunda zona, essas feições se encontram bem preservadas. O último compartimento reconhecido por Gonçalves (1997), denominado de Domínio das Dunas Livres, encontra-se localizado no extremo norte da área e distribui-se desde o pós-praia até cerca de 24 km continente adentro. Tal compartimento é caracterizado pelos campos de dunas livres atuais.

Além desta classificação segundo compartimentos geomorfológicos, Gonçalves (1997) caracterizou as feições eólicas individuais presentes nos Lençóis Maranhenses em dunas livres, lençóis de areias, dunas associadas à vegetação (todas ativas) e dunas fixas (inativas).

As dunas livres encontram-se na extremidade leste dos Lençóis Maranhenses, onde foram definidos quatro tipos principais de formas de leito eólicas: duna barcana, cadeia barcanoide, cadeia oblíqua (barcanas assimétricas) e cordões longitudinais (*trailing ridges*).

Os lençóis de areia têm seu desenvolvimento registrado na zona de pós-praia, estendendo-se até as áreas onde encontrem obstáculos capazes de induzir sua evolução para outras formas.

As dunas associadas à vegetação são classificadas pelo autor em campos de *nebkhas*, “dunas prisioneiras” (dunas que invadem o domínio de florestas e vegetação de médio a grande porte; devem corresponder, em grande parte, aos cordões de precipitação definidos no Quadro 1) e dunas de sombra (*shadow dunes*). Hesp (1988) considera as dunas de sombra como uma variedade de *nebkha*, com assimetria morfológica pronunciada na direção do vento.

Por fim, as dunas fixas encontram-se fora, a sul, da área do campo de dunas ativas. Abrangem, como feições eólicas principais, segundo Gonçalves (1997): dunas parabólicas, “cadeias parabólicas”, cadeias de barcanas ou barcanóides e formas transversais.

Outra classificação para as formas reconhecidas no campo de dunas atual de Lençóis Maranhenses é a proposta por Santos *et al.* (2005) e Santos (2008), baseada em enfoque sistêmico. Nela, reconhecem-se quatro subsistemas eólicos: de alimentação, de entrada, de retenção e de saída. O subsistema de alimentação seria representado pelas praias, o de entrada pela planície de deflação eólica, o de retenção pelas dunas livres e o de saída corresponderia ao retrabalhamento das dunas eólicas por rios.

Giannini (2007) e Giannini *et al.* (2011) classificam os sistemas eólicos costeiros ativos do Brasil em oito tipos ou estágios morfodinâmicos, com razão (quociente) entre saldo sedimentar (influxo-efluxo) e espaço de acumulação crescente de 1 a 8. A classificação baseia-se no grau de desenvolvimento e nas relações mútuas entre quatro categorias de feições morfológicas possíveis, distintas quanto à função e posição espacial. Da fonte praial para o interior, estas quatro categorias de feições são: as de suprimento inicial (dunas frontais e transversais), as de deflação (rupturas, rastros residuais e retrocordões), as de cavalcamento e superposição (barcanas e barcanóides) e as de avanço (cordões de precipitação e lobos deposicionais). Segundo esta classificação, o campo de dunas de Lençóis Maranhenses enquadra-se no tipo 8, caracterizado pela passagem direta de feições de suprimento inicial para feições de cavalcamento e superposição e daí para as de avanço, portanto sem zona deflacionária bem configurada. Já o campo de Pequenos Lençóis pertence ao tipo 7, em que as quatro categorias de feições morfológicas encontram-se bem

representadas. Ainda de acordo com mesmos autores, o tipo 8 representaria um sistema eólico com configuração de equilíbrio ainda não alcançada, daí a ausência de planície deflacionária. Isto estaria ligado à idade relativamente jovem do sistema, em relação ao volume de areia que ele comporta e, portanto, à elevada razão aporte eólico / energia eólica. Os autores citam os campos de dunas de Tutoia e Ponta das Gaivotas como exemplos de sistema tipo 8 anômalo, em que a planície deflacionária se entulha por falta de espaço de acumulação (existência de canal de maré ao interior).

3.4 Padrões evolutivos de dunas

Ewing *et al.* (2006) definiram quatro parâmetros para a caracterização morfoplanimétrica de campos de dunas eólicas: espaçamento de dunas, comprimento de crista, densidade de defeitos e orientação da crista (Figura 2). Para esses autores, a distribuição espacial e a tipologia de feições eólicas nos campos de dunas são os exemplos mais eloquentes de padrões de evolução na natureza, estes resultantes de auto-organização dentro de sistemas complexos. Assim, cada padrão espacial de feições eólicas seria resultado de determinado estágio de evolução ou maturação do sistema no tempo. Tais padrões evoluem com o logaritmo do tempo, com tendências para aumento do espaçamento de dunas e no comprimento e precisão de orientação das cristas e para diminuição na densidade de defeitos (Ewing *et al.* 2006). Como os padrões evolutivos estão relacionados com o tempo de desenvolvimento de cada sistema eólico, o seu estudo quantitativo inclui-se como mais um dentre os métodos indiretos de determinação de idade relativa (ou maturidade) de campo de dunas.

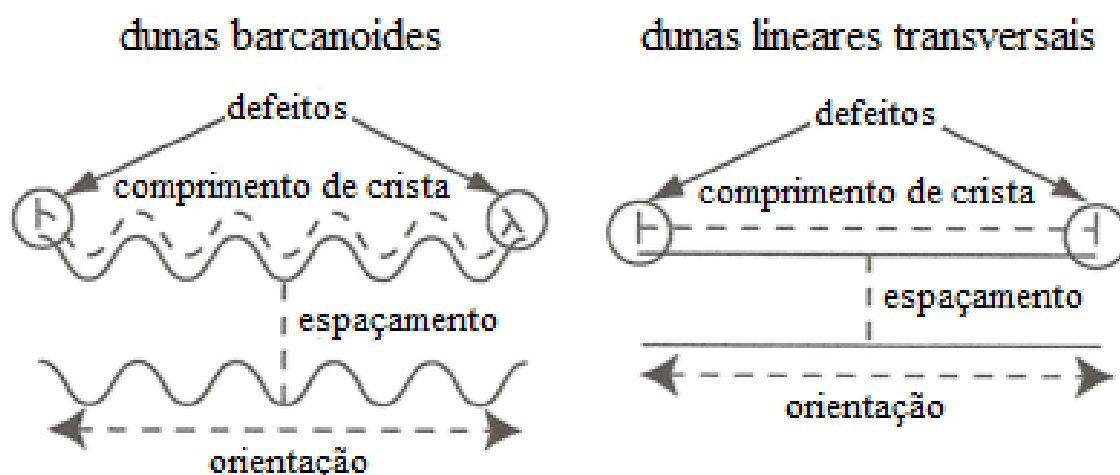


Figura 2. Representação esquemática dos parâmetros morfoplanimétricos espaçamento, comprimento de crista, orientação e defeitos (quebras no padrão da duna ou nas suas terminações), com seus respectivos critérios de medição, em dois tipos de dunas eólicas: barcanoides e lineares transversais. Modificado de Ewing *et al.* (2006).

De todos os parâmetros morfoplanimétricos, o mais característico de idade segundo os autores seria o espaçamento de dunas, uma vez que evolui em função do tempo, das condições iniciais e do comportamento dos defeitos em condições de transporte atuais e passados. Densidade de defeitos é uma variável dinâmica independente. Já a evolução do comprimento de crista é restrita pelas barreiras físicas do sistema, sejam elas externas ou internas, como a área limite do campo de dunas.

Ewing & Kocurek (2010) fizeram uma análise das condições limites dos campos de dunas (geometria da área fonte e área do campo de dunas) e de como estas condições alteram os quatro parâmetros morfoplanimétricos previamente definidos por Ewing *et al.* (2006). Segundo esta análise, a área fonte de uma duna pode ser definida, quanto a sua geometria, como um ponto, uma linha ou um plano. Fontes pontuais encontram-se onde o suprimento de areia para a duna venha de área relativamente estreita, em relação à direção de ação do vento. Fontes lineares aplicam-se aos casos em que a areia provém de uma área com elevada relação comprimento/largura. São bem exemplificadas por praias extensas fornecendo areia para campos de dunas costeiros típicos. Já fontes planas referem-se ao suprimento de sedimento para um campo de dunas através do retrabalhamento eólico do substrato sedimentar sobre o qual o campo de dunas em desenvolvimento se assenta. Pode ser favorecido por situações de constante retrabalhamento de areias do próprio campo de dunas.

Para fontes pontuais e lineares, os padrões evolutivos indicam que espaçamento intercristas e comprimento de crista evoluem em função da distância ao longo do eixo de ação do vento no sistema eólico (Ewing & Kocurek 2010). O que sugere que, sob estas condições de fonte, a distância sobre a qual o padrão evolutivo se desenvolve é proporcional ao tempo. Ou seja, a geometria das fontes pontuais e lineares impõe um padrão evolutivo de assinatura no campo de dunas eólicas. Assim, para estes dois tipos de geometrias, existe a tendência do aumento do espaçamento e comprimento da crista com a distância. Já para campos de dunas com fonte plana, esses parâmetros não variam ao longo do campo (Ewing & Kocurek 2010).

As dimensões (largura e comprimento) do campo de dunas e, portanto, sua área, afetam o padrão evolutivo de desenvolvimento. A área do campo restringe a interação entre dunas na sua direção de migração, e assim, mascara os valores de espaçamento, densidade de defeitos e comprimento de crista (Derickson *et al.* 2008) e limita seu uso como índices de maturidade do padrão evolutivo.

Campos de dunas menores são mais afetados pelos limites ou fronteiras de área, e campos maiores ($> 10^4 \text{ km}^2$), reciprocamente, são menos influenciados por eles. De acordo com dados de Ewing & Kocurek (2010), o máximo espaçamento de dunas, mantidas fixas outras variáveis, é alcançado quando o comprimento do campo de dunas é cinco vezes maior do que a sua largura. Em suma, desse modo, os padrões evolutivos das dunas são

dependentes não só do tempo de maturação, mas também de duas condições de contorno: geometria da área fonte e área do campo de dunas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Pesquisa bibliográfica

A compilação bibliográfica foi feita a partir da consulta de bancos de teses, livros-texto e periódicos recentes de geologia costeira e sedimentologia. Entre os tópicos que mereceram mais atenção, destacam-se: classificações de dunas eólicas; morfodinâmica de sistemas eólicos costeiros; geologia e clima regionais; e parâmetros morfoplanimétricos de campos de dunas.

4.2 Sensoriamento remoto

O trabalho de sensoriamento remoto, já iniciado na iniciação científica da aluna para os campos de dunas de Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis (Hilbert *et al.* 2012), baseou-se em imagens de satélite *Landsat*, de 1990 e 2000. As imagens de sensoriamento remoto foram interpretadas digitalmente via *ArcGis*, *software* de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) que permite integrar as imagens georreferenciadas de sensoriamento remoto com dados obtidos em campo e em laboratório.

Analísaram-se estas imagens quanto a parâmetros morfoplanimétricos definidos por Ewing *et al.* (2006), quais sejam, comprimento de crista, espaçamento de duna, densidade de defeitos e orientação das cristas (Figura 2). A finalidade desta análise foi fazer interpretações de grau de maturidade do sistema e, portanto, indiretamente, de idade de iniciação do campo de dunas, conforme Ewing & Kocurek (2010). Para tanto, o primeiro passo consistiu em traçar as linhas de cristas das dunas, visualmente identificadas nas imagens. Os valores obtidos para os parâmetros morfoplanimétricos foram em seguida incorporados a banco de dados de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para as medidas dos quatro parâmetros morfoplanimétricos mencionados, traçaram-se quatro perfis nos Lençóis Maranhenses, três perfis nos Pequenos Lençóis Maranhenses, três perfis em Tutoia e dois perfis na Ilha do Caju, alinhados com pontos de amostragem sedimentológica onde disponíveis (isto é, Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis). Neles, foram digitalizadas as linhas das cristas das dunas e analisada a variação, em função da distância à praia, dos parâmetros morfoplanimétricos de Ewing *et al.* (2006).

4.3 Atividades de campo

Realizaram-se duas campanhas de campo, a primeira delas nos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis, e a segunda, nas regiões de Barreirinhas e Tutoia, Estado do

Maranhão, e de Parnaíba, Estado do Piauí.

A primeira campanha de campo, realizada em 2010, teve 13 dias de duração e envolveu o percurso a pé, de trechos dos campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis, bem como das praias que lhe atuam como fonte de sedimento. Incluiu o levantamento de 31 pontos de descrição e amostragem, sendo 21 de dunas eólicas, nove de praia e um na margem do rio Preguiças, perto da cidade de Barreirinhas (Figura 3). Nestes pontos, coletou-se um total de 38 amostras, as quais tiveram como códigos-prefixos as siglas LMA, para Lençóis Maranhenses, PLM, para Pequenos Lençóis, e PRE, para rio Preguiças. As amostras de dunas eólicas foram coletadas nas faces de avalanche (*slipface*) do flanco de sotavento, desde a superfície até 10 cm de profundidade, espaçadas aproximadamente 5 km entre si, ao longo de quatro perfis não lineares da praia ao interior do campo de dunas. As amostras da fácies praial foram coletadas da superfície até 10 cm de profundidade, na zona intermarés.

A segunda campanha de campo realizada com dez dias de duração, em 2012. Incluiu a coleta de amostras para análises sedimentológicas em praias e dunas ativas do Estado do Piauí (Figura 4), destinadas à caracterização dos sedimentos costeiros existentes a leste dos campos de dunas ativos do Maranhão. A finalidade desta coleta foi verificar a possível influência, no suprimento sedimentar, da deriva litorânea longitudinal rumo oeste. De modo a separar a influência da deriva da influência da carga sedimentar do rio Parnaíba, esta amostragem foi feita a leste da foz deste rio.

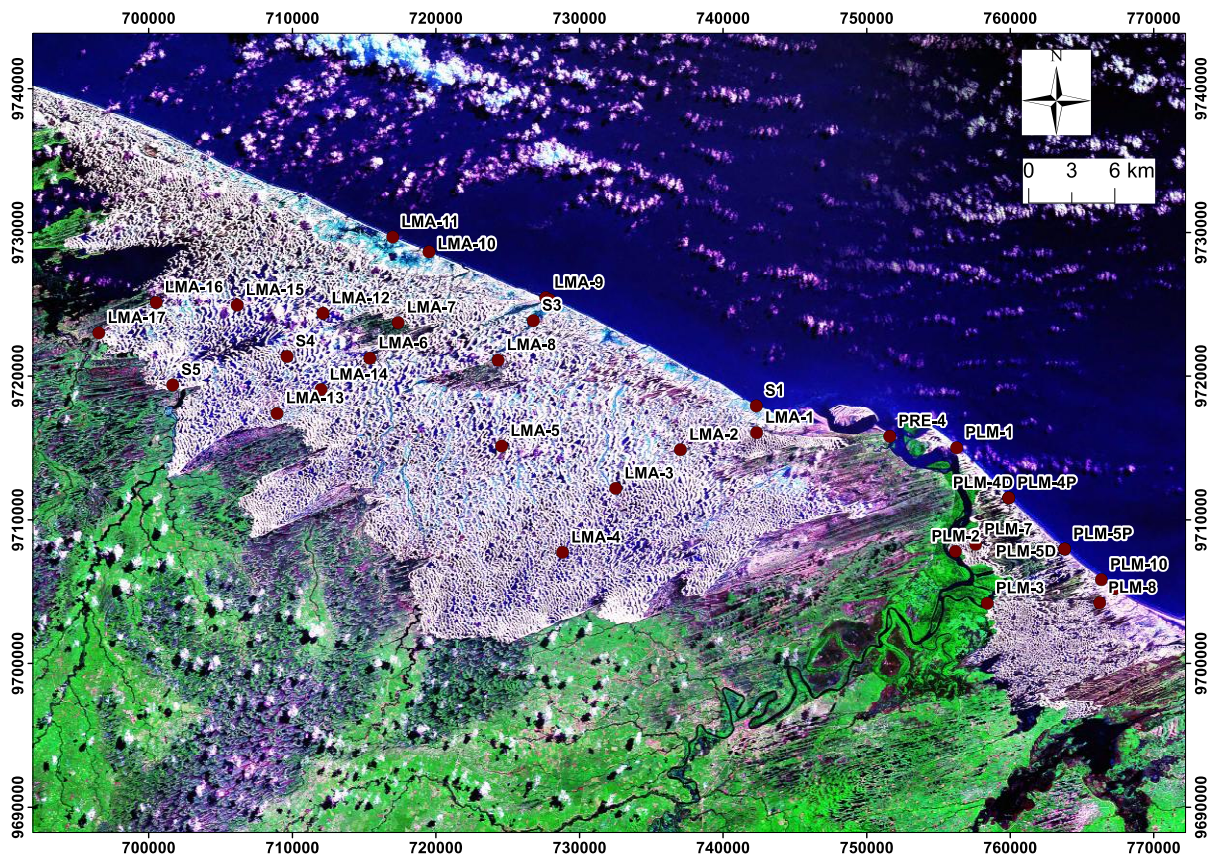


Figura 3. Localização das amostras submetidas a análise sedimentológica, coletadas nos campos de dunas de Lençóis Maranhenses (Lma), Pequenos Lençóis (Plm) e rio Preguiças (Pre), Estado do Maranhão.



Figura 4. Localização de pontos de amostragem de praias e dunas eólicas ativas na costa do Piauí. O objetivo desta coleta foi avaliar a influência, no aporte sedimentar para os campos de dunas do Maranhão, da deriva longitudinal rumo oeste, independente do aporte do rio Parnaíba.

4.4 Atividades de laboratório

As análises laboratoriais previstas e executadas e seus respectivos métodos podem ser resumidos conforme segue:

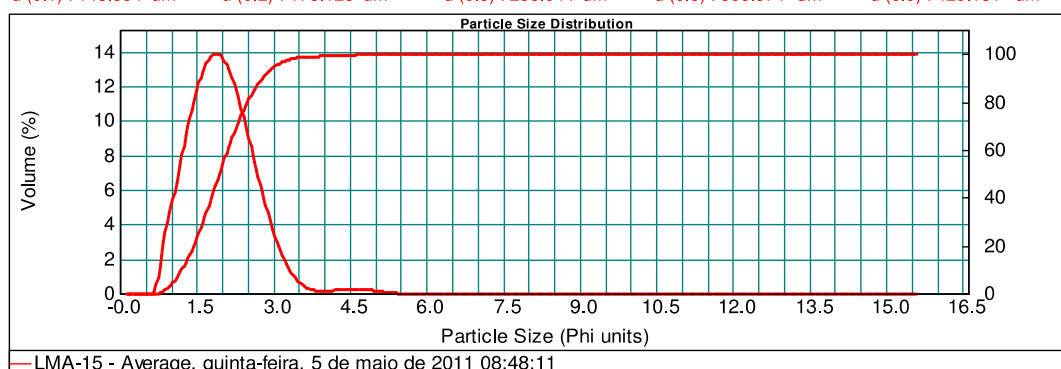
- Granulometria: as 35 amostras coletadas na primeira campanha de campo (Figura 3) e foram analisadas através do granulômetro *Malvern*, modelo *Mastersizer 2000*, que utiliza o método de difração de laser baseado na teoria de Mie-Fraunhofer. Obtiveram-se três estatísticas de distribuição granulométrica, diâmetro médio, desvio padrão e assimetria, calculadas de acordo com a técnica analítica dos momentos de Pearson, para resultados agrupados em intervalos de 0,125 phi. Esses valores estatísticos foram classificados nominalmente, segundo critérios de Folk & Ward (1957). Exemplo de resultado de granulometria fornecida por este equipamento é ilustrado na Figura 5.
- Separação de minerais quanto à densidade: os produtos de peneiramento da fração areia muito fina foram submetidos separadamente a ensaio de afundamento e flutuação em bromofórmio (CHBr_3 , $d \sim 2,83$), empregando-se álcool como solvente. As frações de minerais pesados e leves assim obtidas foram pesadas em balança analítica de precisão (10^{-4} g).
- Separação de minerais magnéticos: as frações afundadas em bromofórmio foram submetidas à separação de minerais magnéticos com o uso de ímã portátil e pesadas em balança de precisão.
- Confecção de lâminas de grãos pesados: as lâminas de grãos de minerais pesados foram confeccionadas em montagem permanente, utilizando-se bálsamo do Canadá natural como meio de imersão.
- Análises mineralógicas: quantificaram-se as assembleias de minerais pesados de cada amostra, em valores percentuais de contagem ao microscópio petrográfico, conforme métodos descritos em Galehouse (1971) e Giannini (1993); a fração areia muito fina, por ser a classe granulométrica de phi imediatamente mais fina que a classe modal dominante no universo de amostras estudado, foi a escolhida para o ensaio.
- Captura de fotomicrografias digitais: aspectos microscópicos texturais e/ou mineralógicos mais típicos e representativos das feições geomorfológicas ou unidades sedimentares em estudo foram gravados em arquivos digitais no sistema *Leica Q-Win*.

RESULTADOS DE ENSAIO GRANULOMÉTRICO À LASER

Operador(a): Sfincter **Data:** quinta-feira, 5 de maio de 2011 08:48:11
Nome da amostra: LMA-15 - Average **Nome da partícula:** Quartz
Acessório: Hydro 2000MU (A) **Dispersante:** Water
Observações: Velocidade da Bomba: 2250 RPM **Residual:** 0.969 %
Obscuração: 11.56 %

Percentis da Distribuição:

d (0.1) : 143.354 um d (0.2) : 176.125 um d (0.5) : 258.044 um d (0.8) : 366.374 um d (0.9) : 429.181 um



Phi	Volume In %	Phi	Volume In %	Phi	Volume In %	Parâmetros estatísticos da Distribuição Granulométrica (Pearson) - incluído material pelítico
-1.0	0.00	5.0	0.14	11.0	0.00	
-0.5	0.00	5.5	0.00	11.5	0.00	
0.0	0.00	6.0	0.00	12.0	0.00	
0.5	0.00	6.5	0.00	12.5	0.00	
1.0	3.65	7.0	0.00	13.0	0.00	Diâmetro médio: 2,066 Desvio Padrão: 0,645
1.5	19.02	7.5	0.00	13.5	0.00	
2.0	30.19	8.0	0.00	14.0	0.00	
2.5	26.93	8.5	0.00	14.5	0.00	
3.0	14.34	9.0	0.00	15.0	0.00	
3.5	4.21	9.5	0.00	15.5	0.00	Assimetria: 0,833 Curtose: 4,853
4.0	0.61	10.0	0.00			
4.5	0.43	10.5	0.00			
5.0	0.48	11.0	0.00			
Parâmetros estatísticos da Distribuição Granulométrica (Pearson) - excluído material pelítico						Diâmetro médio: 2,038 Desvio Padrão: 0,588
						Assimetria: 0,284 Curtose: 2,649

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
 Rua do Lago, 562 - Cidade Universitária São Paulo/ SP - Brasil
 CEP 05508-080 Tel: (11) 3091-4131 Fax: (11) 3091-4207
 www.igc.com.br email: labsed@igc.usp.br

Malvern Instruments Ltd.
 Malvern, UK
 Tel := +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

Mastersizer 2000 Ver. 5.22
 Serial Number : MAL000216

File name: LMA-bckp
 Record Number: 151
 21/6/2011 16:27:55

Figura 5. Exemplo de resultado do ensaio granulométrico a difração de laser (amostra LMA - 15), com distribuição em volume agrupada em classes de 0,5 phi e estatísticas calculadas para intervalos de 0,125 phi.

4.5 Tratamento gráfico-estatístico dos dados

As distâncias intercristas e os comprimentos de crista, medidos por sensoriamento remoto, foram lançados em gráficos binários em função da distância ao longo da praia. Para construir esses gráficos, assim como suas retas de regressão e respectivos coeficientes de correlação linear (r), utilizou-se o *software* Minitab. Para avaliar os resultados de r , o critério usado foi o nível de significância ou erro I (α), que corresponde, no caso, à probabilidade de aceitar-se correlação inexistente. Os valores máximos de α foram obtidos por interpolação, comparando o quociente t do teste de regressão unicaudal de distribuição (t de Student).

Representou-se a distribuição de frequências do comprimento de crista e da distância intercrista em diagramas em caixa (*boxplot*) e em barra (histograma), ferramentas gráficas de estatística descritiva que fornecem um resumo visual desta distribuição. O diagrama em caixa permite observar a extensão das caudas da distribuição (através dos bigodes e dos *outliers*) e a tendência central (através da mediana e do primeiro e terceiro quartis). Já o diagrama em barras permite observar a distribuição dos dados em classes de valores.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Trabalho de campo

5.1.1 Primeira campanha

O campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses apresenta assimetria bastante pronunciada, com seu lado sudeste avançando rumo SW até 12 km enquanto seu lado oeste avança menos da metade dessa distância (Figura 16), limitado que está pelo rio Preguiças e sua foz (Figura 6A). Este campo de dunas é composto principalmente por barcanas e cadeias barcanoides, com inter espaçamento de 100 a 200 m, o qual exhibe tendência de aumento para o interior e para W. As zonas de deflação com retrocordões e rastros lineares residuais ocupam 30% da área total do campo de dunas e concentram-se na sua porção noroeste e no extrema sudeste. As dunas barcanas e cadeias barcanoides estão separadas da praia por uma planície composta por *nebkhas*, protodunas e pavimentos de depósitos residuais (*lags*) (Figura 6B) compostos por areia grossa e grânulos. A praia de Caburé possui morfodinâmica dissipativa a intermediária, na maré alta, e dissipativa, na maré baixa, e contém depósitos de mangue em erosão, aflorantes (Figura 6C).



Figura 6. Aspectos de campo dos Pequenos Lençóis Maranhenses: A. Dunas avançando por sobre mangue às margens do rio Preguiças. B. Campo de *nebkhas*, na planície deflacionar do campo de dunas. C. Depósitos de mangue aflorando na praia de Caburé.

Os Lençóis Maranhenses constituem o maior campo de dunas do Brasil, limitado a SE pela foz do rio Preguiças e a W pela Barra da Baleia. Avança até 30 km ao interior sobre dunas estabilizadas e corpos de água e, muitas vezes, represa drenagens. Barcanas e cadeias barcanoides constituem a grande maioria das formas dunares, com comprimentos variáveis de 200 a 500 m e alturas de 10 a 30 m (Figura 7A). As dunas são separadas da praia por uma planície com 1 a 2 km de largura, composta por lençóis de areia e áreas por vezes alagadas onde se formam lagunas rasas temporárias (até 30 cm de profundidade), com deposição de material argiloso (Figura 7B). Planícies deflacionárias (falhas de cobertura ou *bush pockets*) ocorrem no interior do campo de dunas, restritas às localidades de Queimada dos Britos e Baixa Grande, e na margem sudeste. Ocupam somente 11% da área total e incluem rastros lineares residuais, retrocordões e áreas alagadas (Figura 7C e Figura 7D).

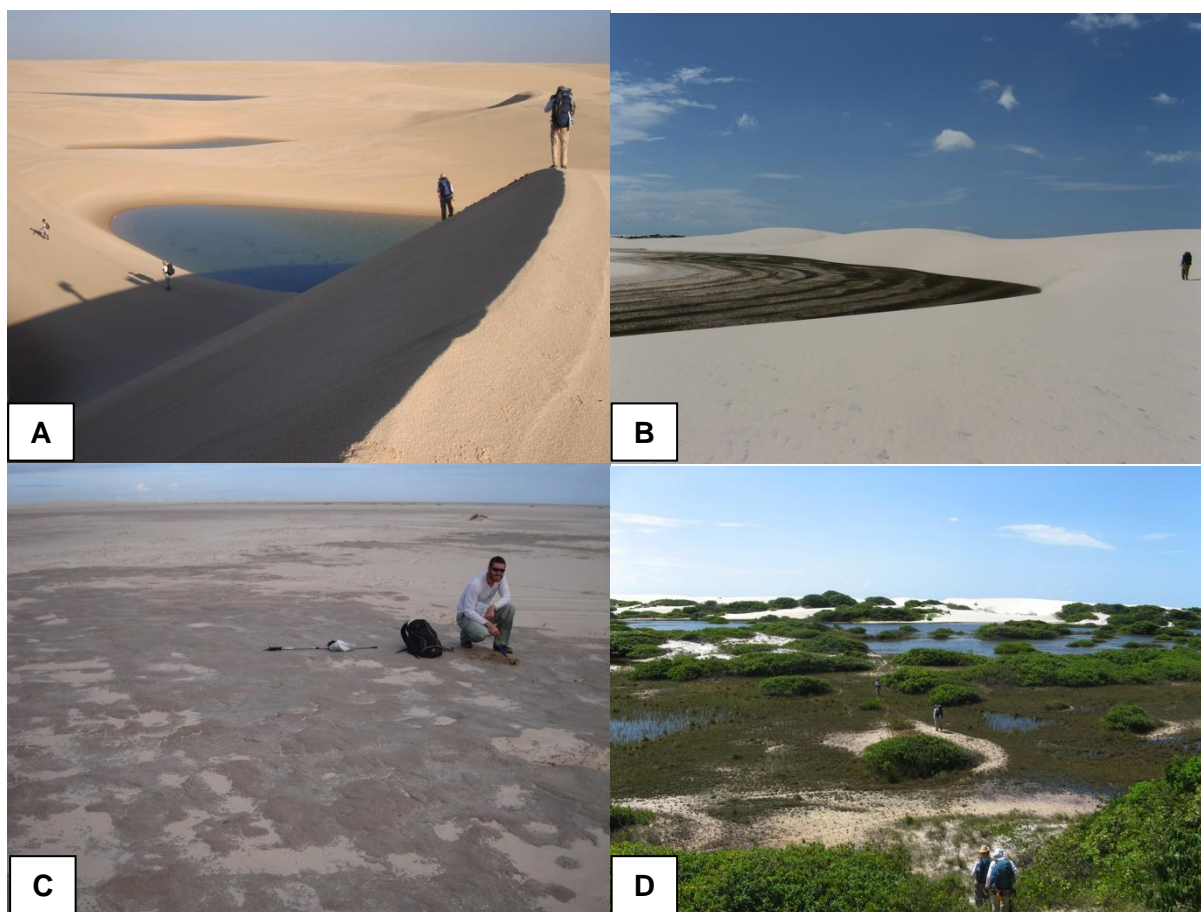


Figura 7. Aspectos de campo dos Lençóis Maranhenses. A. Dunas barcanas com depressões interdunas alagadas. B. Dunas barcanas com vegetação e retrocordões. C. Dunas separadas da praia por uma planície composta de lençóis de areia e áreas alagadas com eventual deposição de material argiloso. D. As planícies deflacionárias no interior do campo de dunas (falhas de cobertura) são compostas por rastros lineares residuais, retrocordões e áreas alagadas.

5.1.2 Segunda campanha

O campo de dunas da costa do Piauí avança 7 km ao interior, rumo SW. Na área, abrange zonas deflacionárias extensas, com rastros lineares em seu interior. O campo de dunas tem como principais formas dunares cadeias barcanoides e barcanas isoladas, com comprimento de duna de 15 m e altura de 3 m. A praia de Macapá é reflexiva, com berma de mergulho suave. Não apresenta dunas frontais definidas, mas sim, um lençol de areia grossa com *nebhkas*. A praia do Coqueiro, localizada a W, possui morfodinâmica intermediária, com dunas frontais baixas (menos de 1,5 m), pouco preservadas devido à urbanização. Os três pontos de coleta nesta área encontram-se descritos com mais detalhes a seguir.

5.1.2.1 LM - 58

Este ponto localiza-se na estrada que liga Luís Correia a Carnaubinhas, na porção leste do campo de dunas de Luís Correia. Nele, observaram-se dunas barcanas com dimensões aproximadas de 15 m de comprimento, por 3 m de altura e 10 m de largura

(Figura 8A), granulação areia fina a muito fina, e face de avalanche inteiramente marcada por depósitos lingoides de fluxo granular ou *grainflow* (Figura 8B). As zonas interdunas apresentam-se colonizadas, em áreas limitadas (menos de 10% de sua extensão), por vegetação rasteira, sobretudo gramíneas. No restante, estas zonas são cobertas por marcas onduladas achatadas, de crista bifurcada, com concentração de grânulos nas porções mais deflacionárias (Figura 8C).

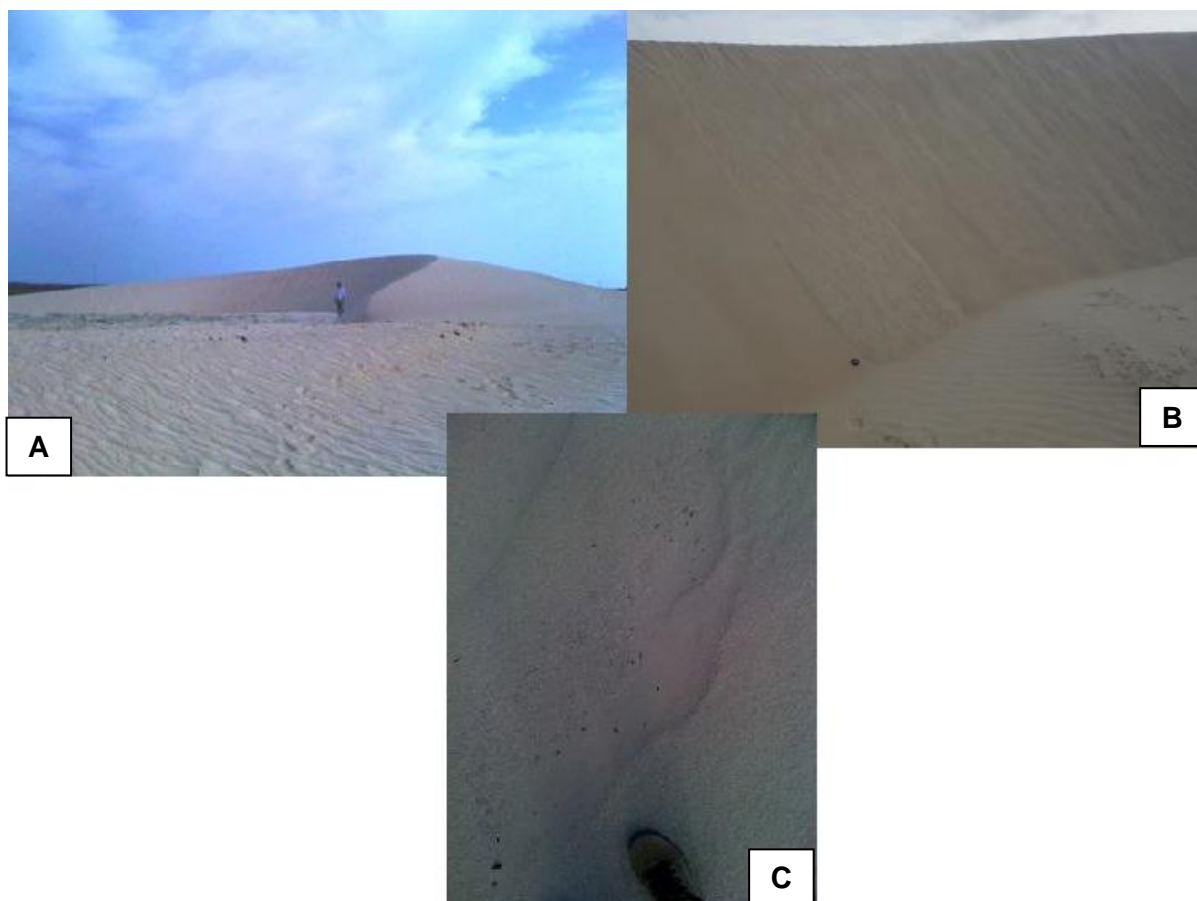


Figura 8. Características do ponto LM – 58, localizado na parte leste do campo de dunas de Luís Correia. A. Duna barcana de altura métrica, em meio a planície interdunas coberta por ondulas. Notar crescimento de gramíneas na planície imediatamente a sotavento da barcana. B Face de avalanche de duna barcana, marcada por línguas de grainflow, e pedestal de baixo mergulho (*plinth*), coberto por ondulas formadas por ventos secundários. C. Concentração de grânulos, inclusive bioclastos carbonáticos, na zona deflacionária da planície interdunas. Notar cordões de grânulos nas cristas das ondulas eólicas. Ponto LM - 58, parte leste do campo de dunas de Luís Correia.

5.1.2.2 LM - 59

Este ponto localiza-se na praia de Macapá, Luís Correia - PI, situada na foz do rio Macapá, a 40 km do rio Parnaíba. Observou-se morfodinâmica praial reflexiva (Figura 9A), com berma de mergulho suave. Não há dunas frontais bem configuradas, mas sim um lençol de areia eólica grossa, em meio ao qual *nebkhas* decimétricos, em forma de dunas de sombra construídas por vegetação estoloniforme (Figura 9B), ocorrem isolados. Este lençol constitui aparentemente a zona de alimentação do campo de dunas que se vê a SW da praia.

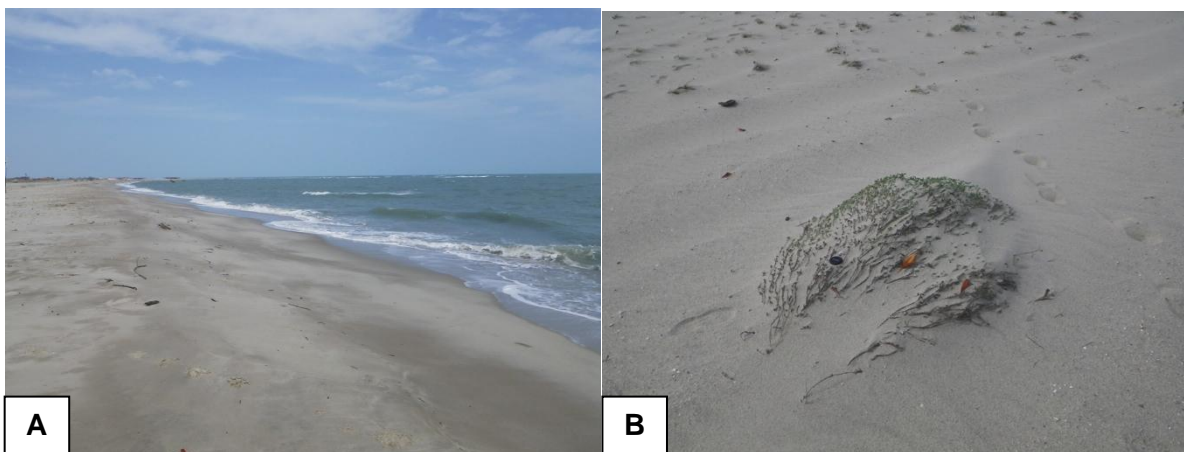


Figura 9. Aspectos do ponto LM – 59, lençol de areia de cerca de 200 m da praia de Macapá. A. Praia de Macapá – PI, intermediária reflexiva, com cúspides de arco decamétrico na face de praia. B. *Nebkha* em forma semi-piramidal, típica de duna de sombra (*shadow dune*). Vento efetivo voltado para o canto superior direito da foto à direita (SW).

5.1.2.3 LM - 61

Este ponto está localizado na praia do Coqueiro, a 10 km de Luís Correia – PI e a 30 km do rio Parnaíba. A praia é intermediária de baixa energia (altura de quebra de onda inferior a 0,5m no momento da observação) (Figura 10) e não possui berma bem definida. Encontram-se dunas frontais baixas (menos de 1,5 m), pouco preservadas devido a urbanização. A areia da praia é grossa, com grânulos e presença de seixos pequenos esparsos, principalmente bioclásticos.



Figura 10. Praia do Coqueiro, em Luís Correia – PI, intermediária de baixa energia. Ponto LM – 61.

5.2 Sensoriamento remoto

5.2.1 Lençóis Maranhenses

Para o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses, foram feitos quatro perfis designados 1 a 4, de SE para NW, destinados à análise dos parâmetros de Ewing *et al.* (2006) (Figura 11).

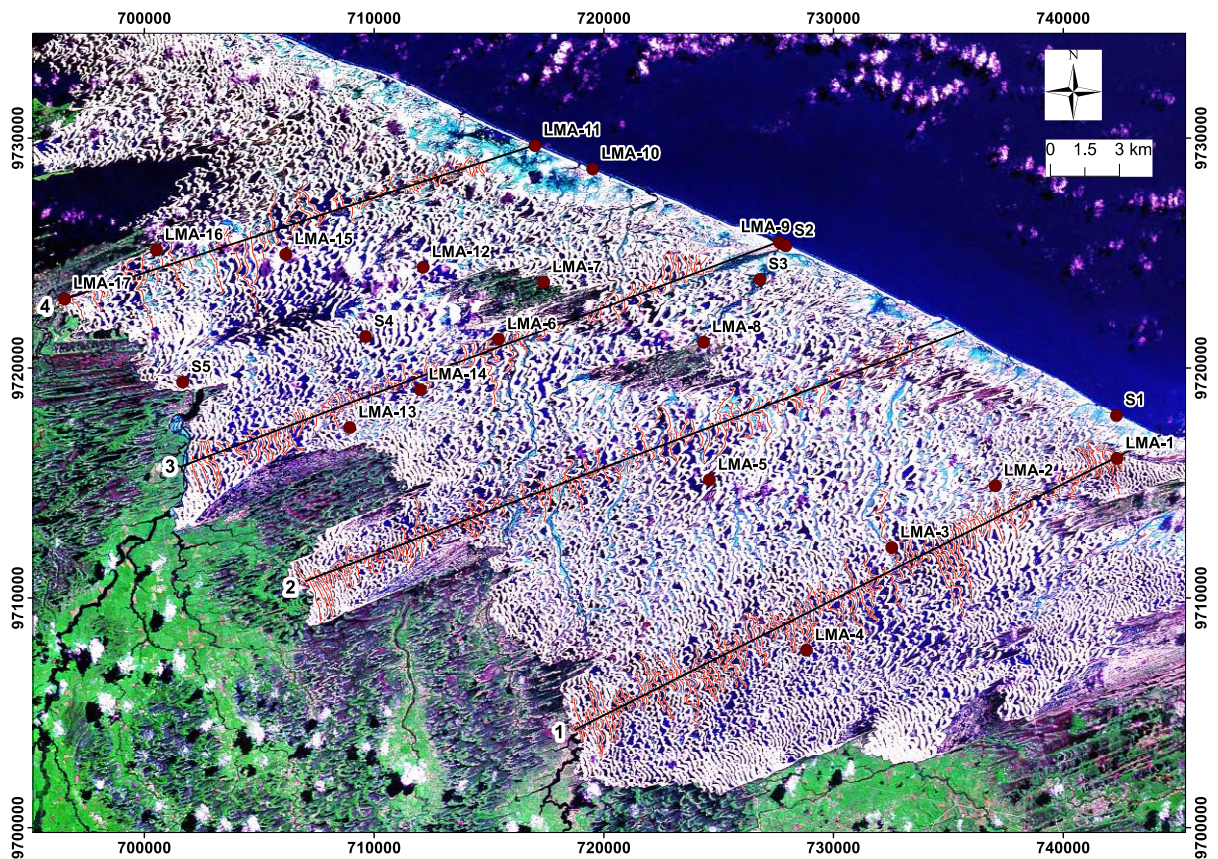


Figura 11. Quatro perfis (linhas em preto 1 a 4, orientadas de SW para NE) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing *et al.* (2006) no campo de dunas de Lençóis Maranhenses. Linhas finas laranjas correspondem às cristas de dunas mapeadas.

As figuras 12 a 15 apresentam os resultados de comprimento de crista e distância intercristas obtidos para todos os perfis do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A Figura 12 indica que a tendência, prevista no modelo de Ewing *et al.* (2006), de que haja aumento da distância entre cristas com a elevação da distância da praia, não se observa nos perfis analisados, ou pelo menos não com consistência estatística aceitável. Por vezes, como no perfil 2, chega-se a ter coeficiente de correlação negativo, ou seja tendência inversa da esperada. Tampouco se observa a outra tendência relatada no modelo, de aumento do comprimento de crista com a elevação da distância à praia (Figura 13). Existem, por outro lado, tendências bem definidas de variação dos parâmetros morfoplanimétricos do perfil 1 ao 4, ou seja, de SE para NW. Estas tendências são de aumento do espaçamento intercristas (Figura 14) e diminuição do comprimento de crista (Figura 15), nesse rumo. Elas indicam que a porção noroeste dos Lençóis Maranhenses é mais madura, porém, ao mesmo tempo, mais afetada por limitações de tamanho, interpretação compatível com a redução observada nas dimensões e na saturação arenosa deste campo de dunas rumo NW.

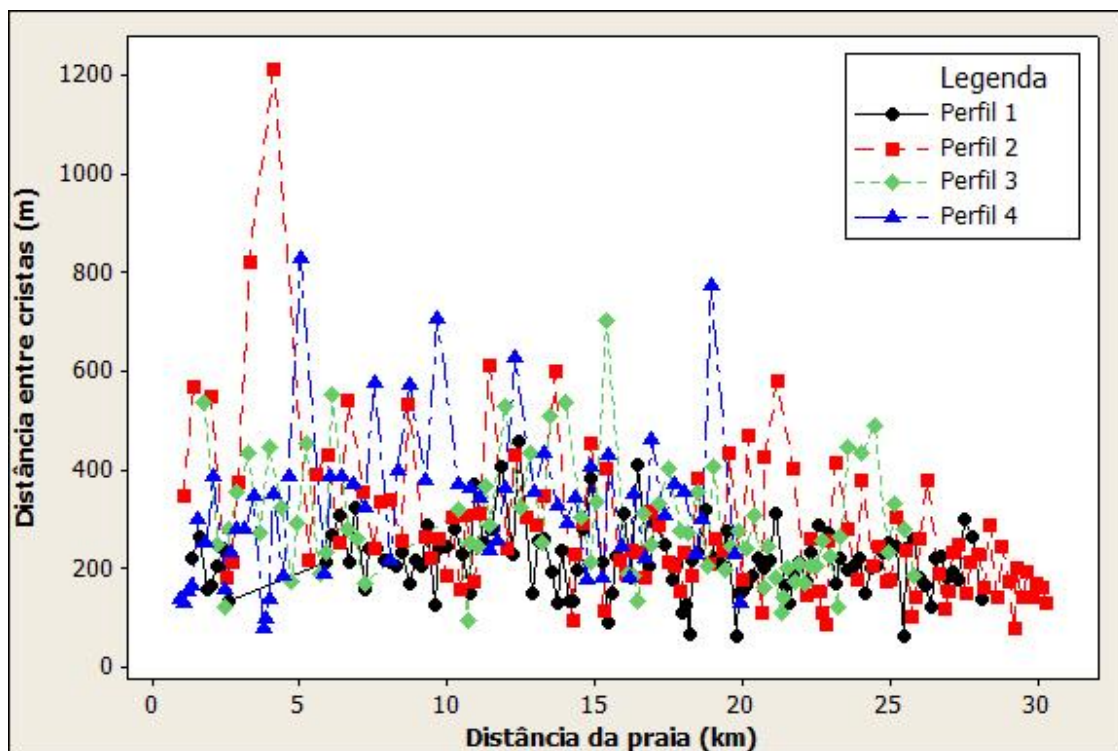


Figura 12. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis analisados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,126, com erro I de 0,3 ou 30%; r_2 -0,476, com erro I de 0,000 ou 0 %; r_3 -0,207, com erro I de 0,079 ou 7,9%; r_4 0,184, com erro I de 0,163 ou 16,3%.

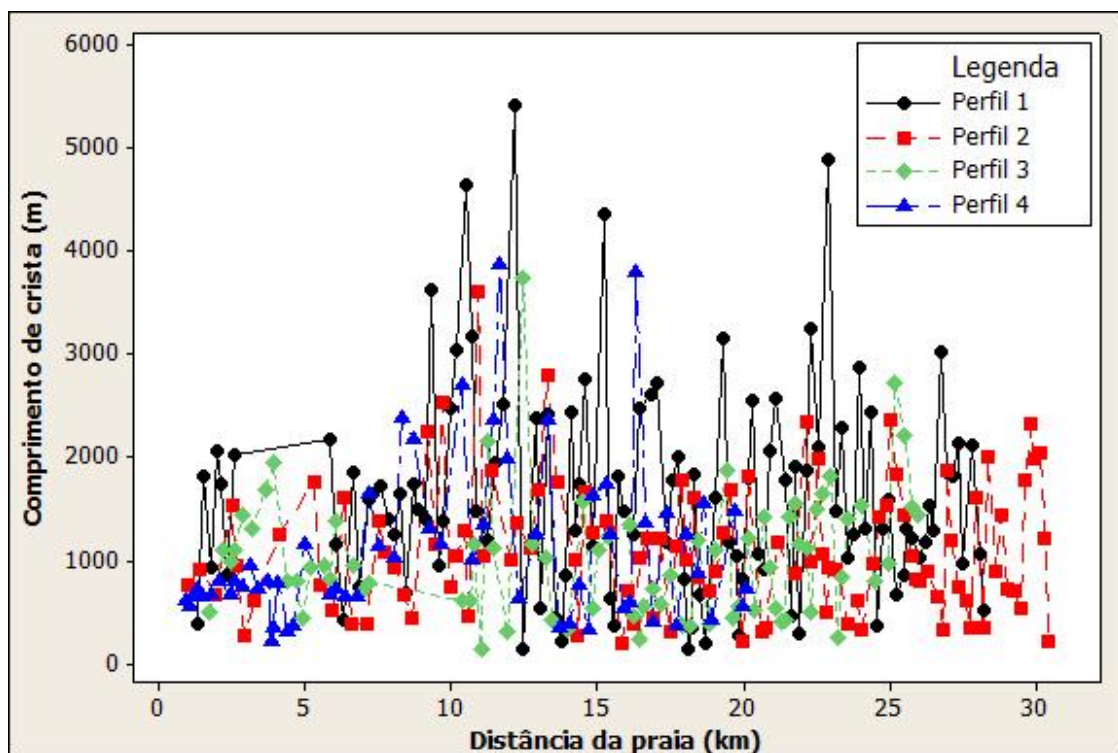


Figura 13. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis analisados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,073, com erro I de 0,423 ou 42,3%; r_2 0,019, com erro I de 0,845 ou 84,5; r_3 0,098, com erro I de 0,394 ou 39,4%; r_4 0,235, com erro I de 0,071 ou 7,1%.

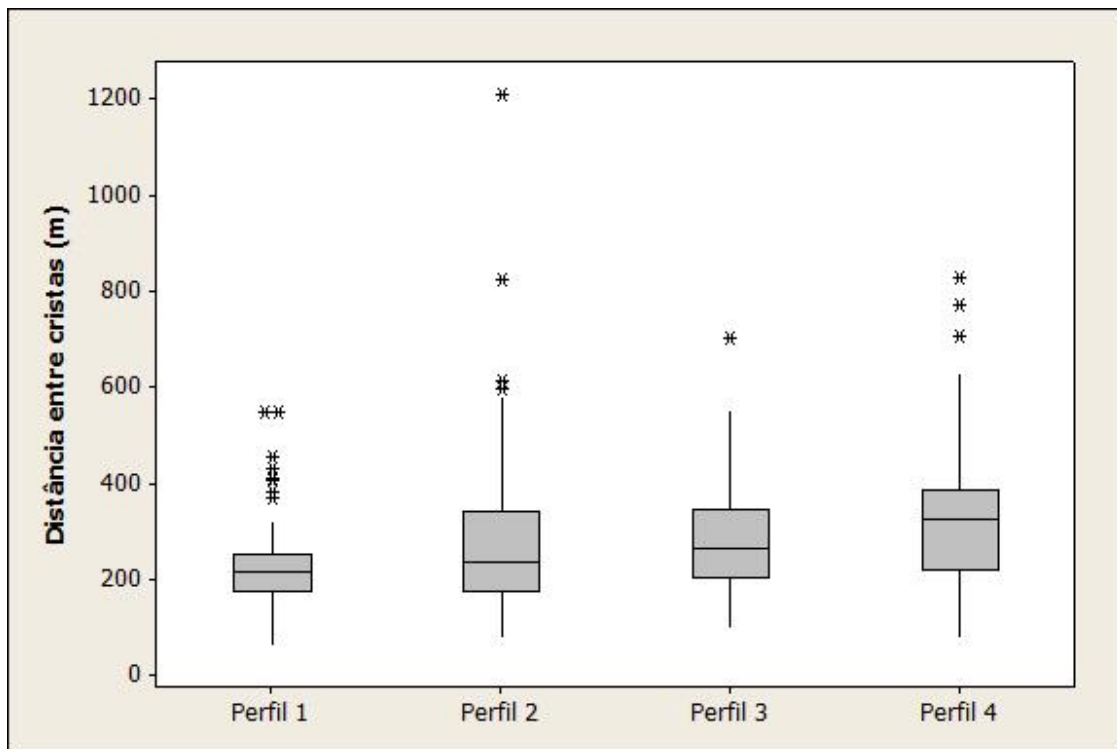


Figura 14. Gráfico em caixas (*boxplot*) dos valores da distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Lençóis Maranhenses. Notar aumento dos valores médios e, grosso modo, do intervalo interquartis, de SE (perfil 1) para NW (perfil 4).

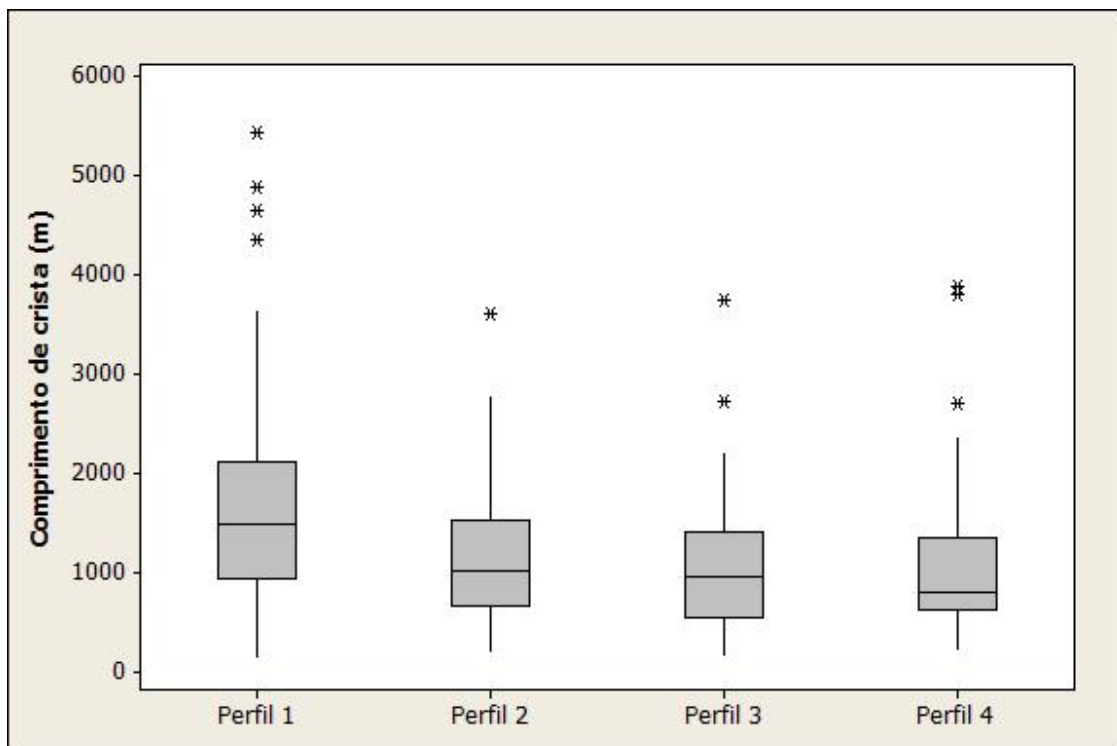


Figura 15. Gráfico em caixas (*boxplot*) dos valores de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas eólicas dos Lençóis Maranhenses. Notar diminuição dos valores médios e do segundo quartil de SE (perfil 1) para NW (perfil 4).

5.2.2 Pequenos Lençóis Maranhenses

No campo de dunas dos pequenos Lençóis, três perfis, designados 1 a 3, de SE para NW (Figura 16), foram estudados para análise dos parâmetros de Ewing *et al.* (2006).

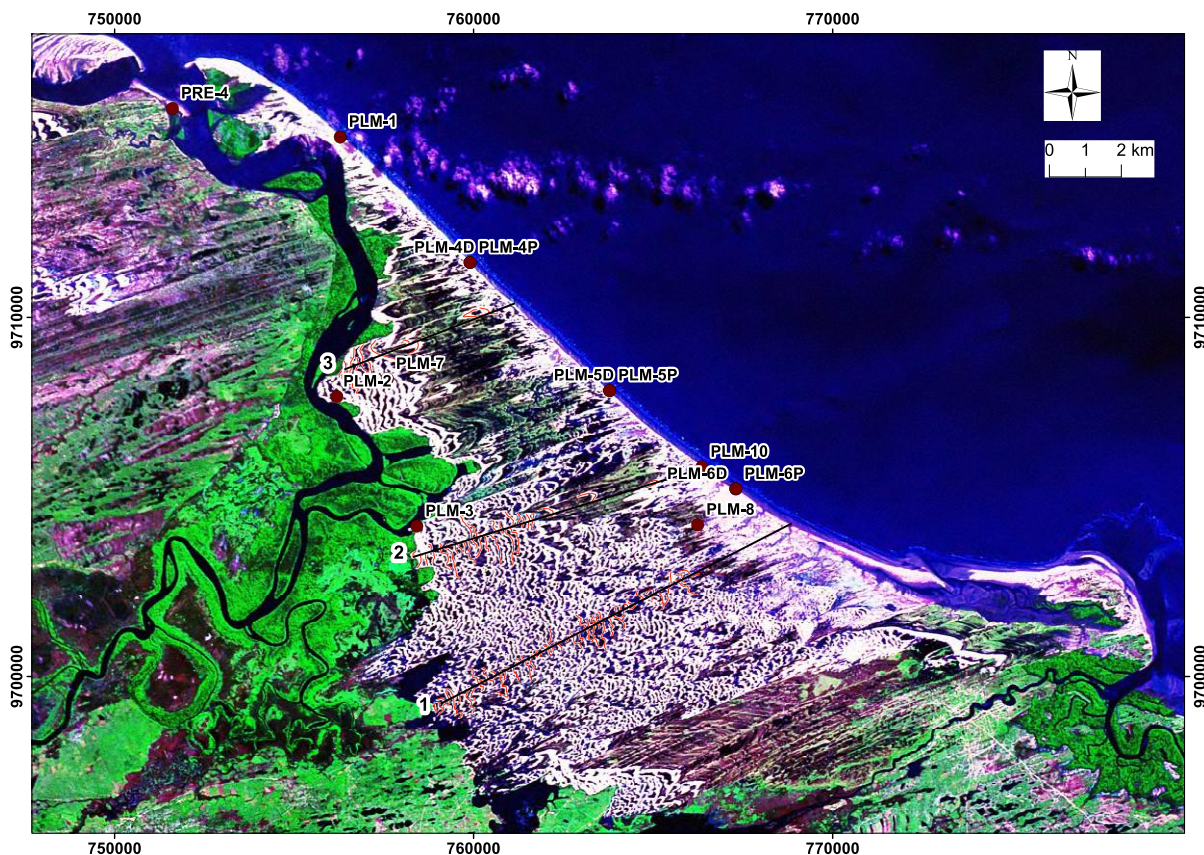


Figura 16. Três perfis (linhas em preto 1 a 3, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing *et al.* (2006) no campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Linhas finas laranjas correspondem às cristas de dunas mapeadas.

Através da Figura 17, observa-se que a tendência de aumento da distância intercristas com a elevação da distância da praia, prevista no modelo de Ewing *et al.* (2006), não ocorre nos Pequenos Lençóis Maranhenses, com exceção do perfil 2, que apresenta r de 0,383 e erro I baixo (7,1 %). Os valores de distância entre cristas aumentam do perfil 1 ao 3, porém estes resultados são influenciados pela existência de zonas deflacionárias nos perfis 2 e 3. Retiradas estas zonas, a tendência da mediana da distribuição de distância intercristas se inverte (Figura 18).

Em relação ao comprimento de crista, não há tendência de aumento com a distância da praia (Figura 19), como seria esperado de acordo com o modelo de Ewing *et al.* (2006), e os valores de erro I elevados excluem qualquer probabilidade de correlação linear. Porém, observa-se aumento do comprimento de crista do perfil 1 ao 3, portanto de SE para NW (Figura 20). Os Pequenos Lençóis, assim como os Lençóis Maranhenses, apresentam decréscimo de saturação em areia e de extensão longitudinal do campo de dunas, de SE para NW. Desse modo, o aumento de comprimento de crista para NW deve estar ligado a uma característica particular deste sistema: o menor desenvolvimento longitudinal dos lobos deposicionais devido ao truncamento da parte distal de sua porção noroeste pelo rio

Preguiças. Com isso, esta porção do campo de dunas dos Pequenos Lençóis torna-se mais equidimensional, em planta, o que favorece cadeias barcanoides lateralmente mais contínuas e, portanto, com cristas mais extensas.

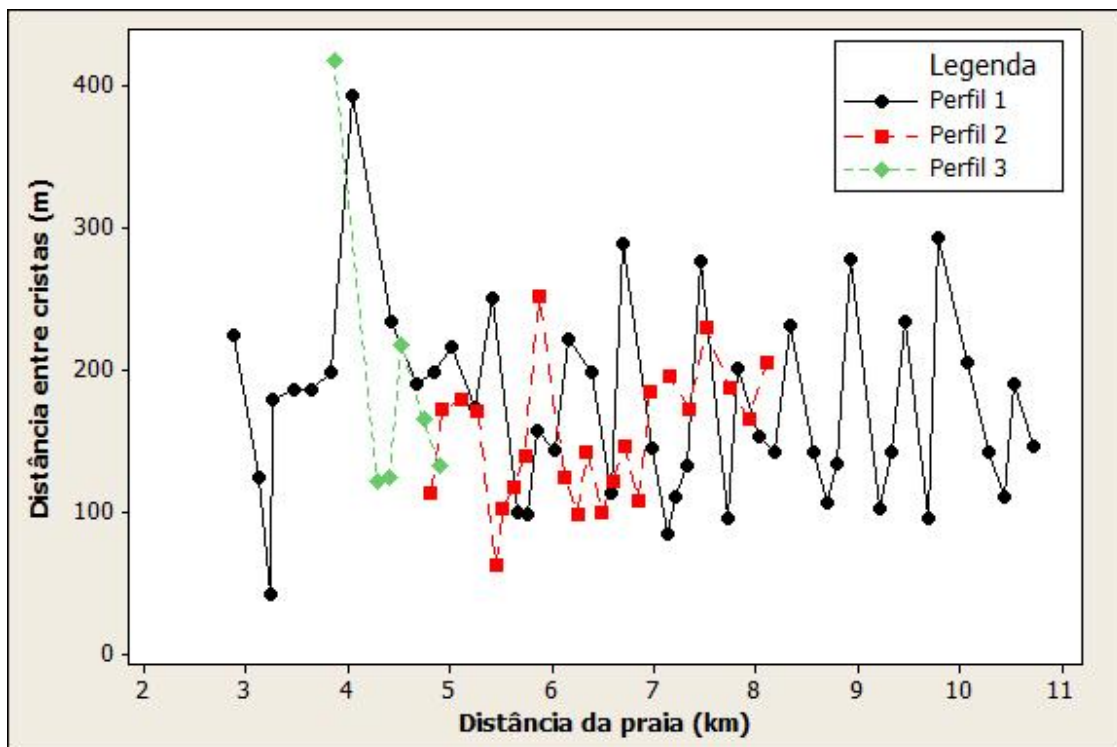


Figura 17. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,126, com erro I de 0,403 ou 40,3%; r_2 0,383, com erro I de 0,071 ou 7,1 %; e r_3 0,147, com erro I de 0,814 ou 81,4 %.

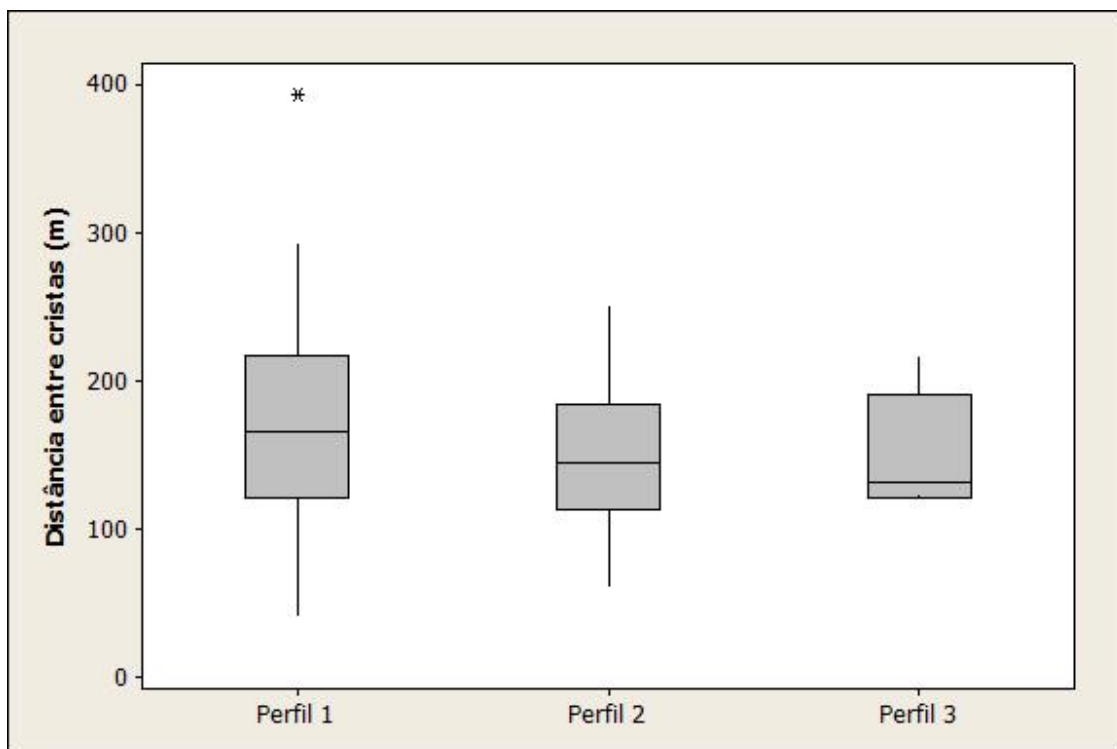


Figura 18. Gráfico em caixas (*boxplot*) de distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Pequenos Lençóis Maranhenses, retirando a zona deflacionária que se encontra nos perfis 1 e 2.

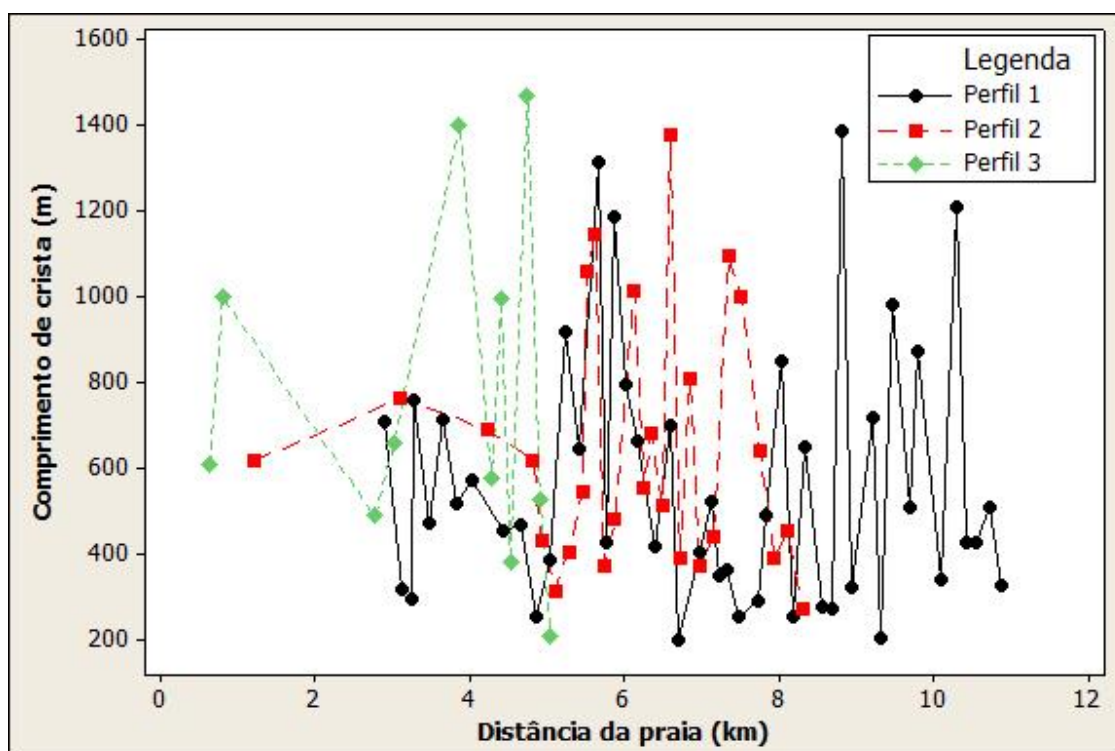


Figura 19. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,004, com erro I de 0,979 ou 97,9%; r_2 -0,045, com erro I de 0,822 ou 82,2 %; r_3 -0,054, com erro I de 0,874 ou 87,4 %.

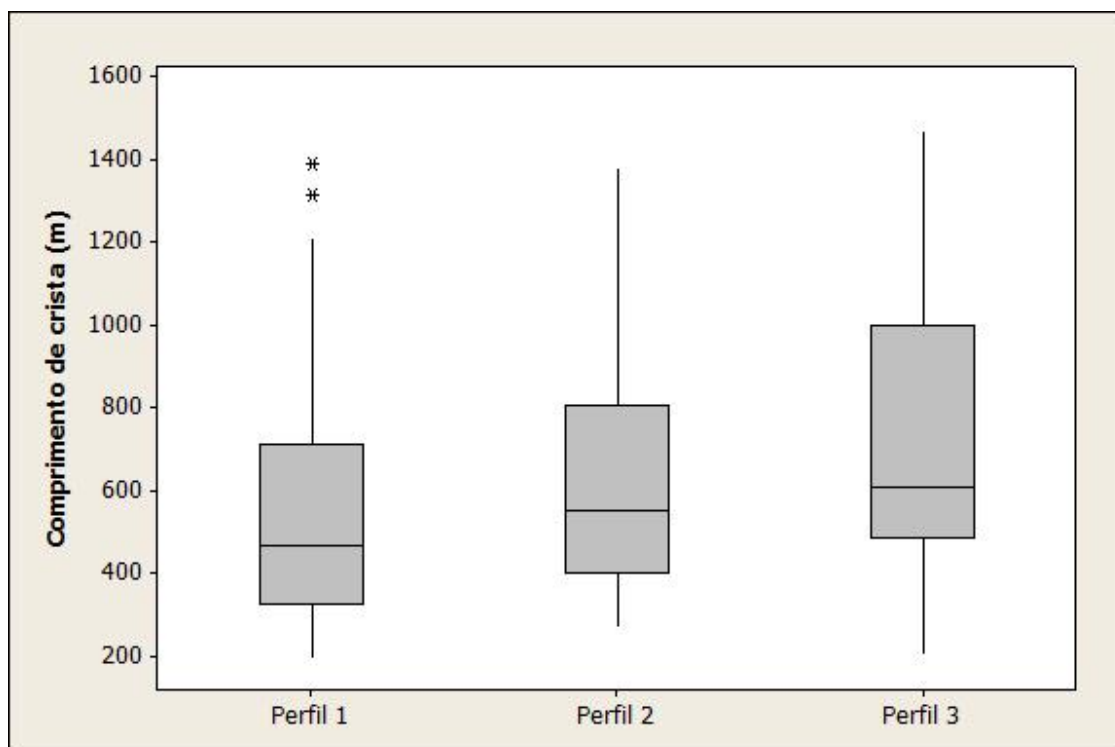


Figura 20. Gráfico em caixas (*boxplot*) de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas eólico dos Pequenos Lençóis Maranhenses. Notar aumento da mediana e do intervalo interquartil do perfil 1 (SE) para o 3 (NW).

5.2.3 Tutoia

No campo de dunas de Tutoia, três perfis, designados 1 a 3, de SE para NW (Figura 21), foram estudados para análise dos parâmetros de Ewing *et al.* (2006).



Figura 21. Três perfis (linhas em preto 1 a 3, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing *et al.* (2006) no campo de dunas de Tutoia. Linhas finas laranjas correspondem às cristas de dunas mapeadas.

As figuras 22 a 25 apresentam os resultados de comprimento de crista e distância entre cristas obtidos para todos os perfis deste campo de dunas. Em linhas gerais, os padrões de variação são semelhantes aos encontrados nos Lençóis Maranhenses. Assim, não se observam as tendências previstas no modelo de Ewing *et al.* (2006) de aumento da distância entre cristas (Figura 22) e de comprimento da crista (Figura 23) com a elevação da distância da praia, exceto pelo perfil 3, o qual apresenta coeficiente de correlação de 0,425, com erro I baixo (2,4 %). Ainda verificam-se, do perfil 1 ao 3 (SE para NW), tendências bem definidas de diminuição do espaçamento intercristas (Figura 24) e do comprimento de crista (Figura 25), o que indica que a porção noroeste do campo de dunas de Tutoia é mais madura, porém, ao mesmo tempo, mais afetada por limitações de tamanho, o que pode mais uma vez ser atribuído à redução nas dimensões e na saturação arenosa do campo de dunas rumo NW.

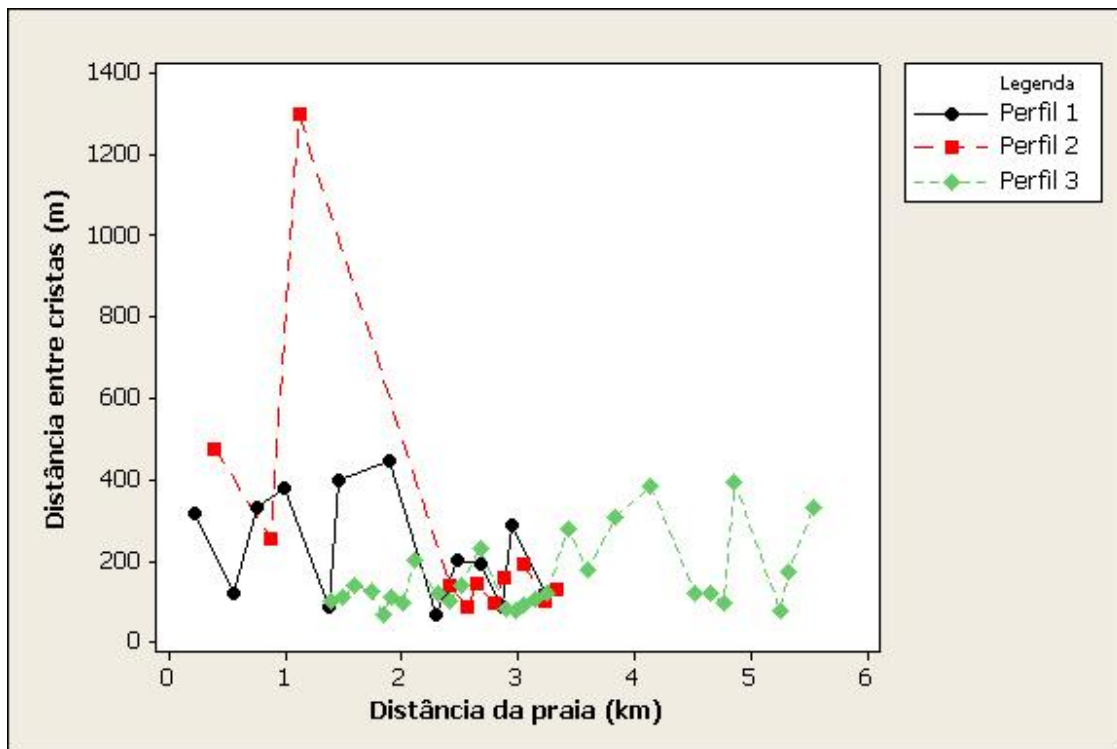


Figura 22. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,387, com erro I de 0,172 ou 17,2 %; r_2 0,113, com erro I de 0,790 ou 79,0 %; e r_3 0,425, com erro I de 0,024 ou 2,4 %.

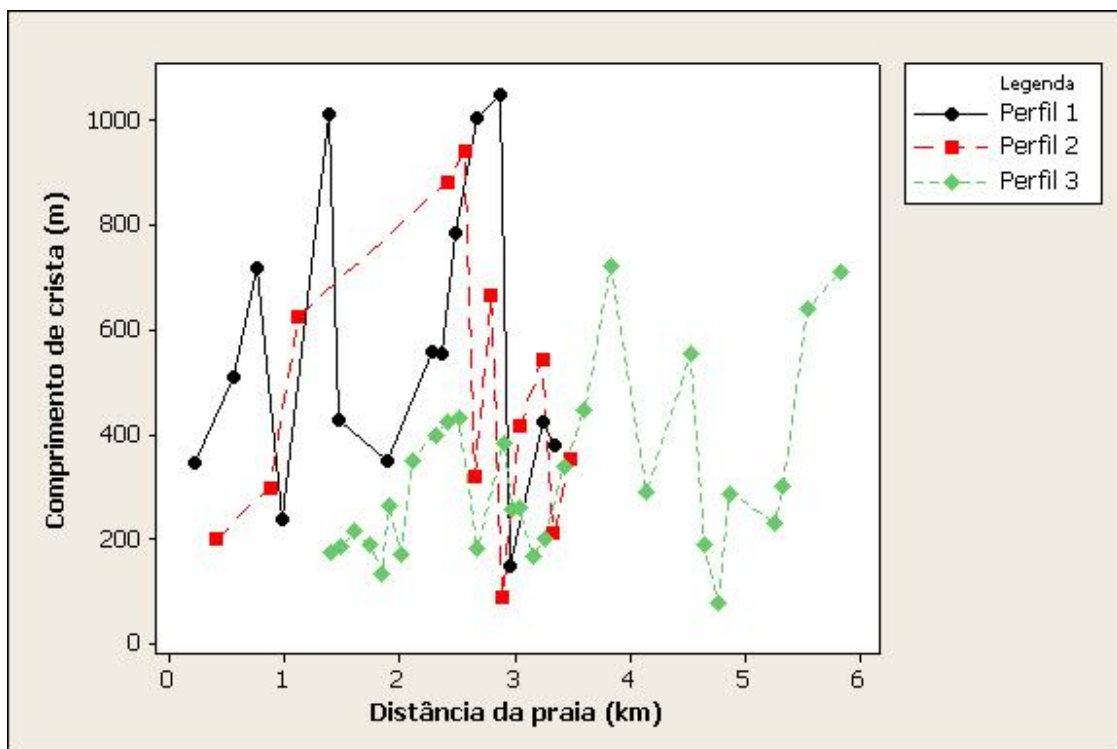


Figura 23. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,107, com erro I de 0,704 ou 70,4 %; r_2 0,065, com erro I de 0,841 ou 84,1 %; e r_3 0,425, com erro I de 0,021 ou 2,1 %.

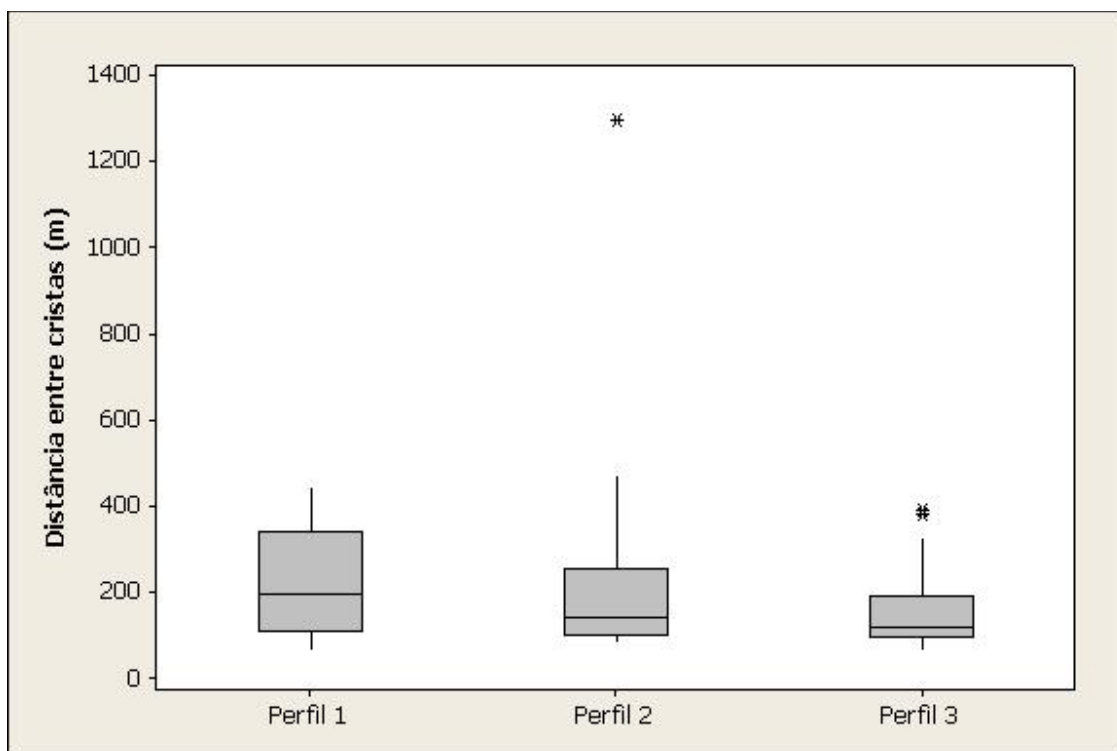


Figura 24. Gráfico em caixas (*boxplot*) de distância entre cristas para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Notar queda da mediana e do quartil superior do perfil 1 para o perfil 3.

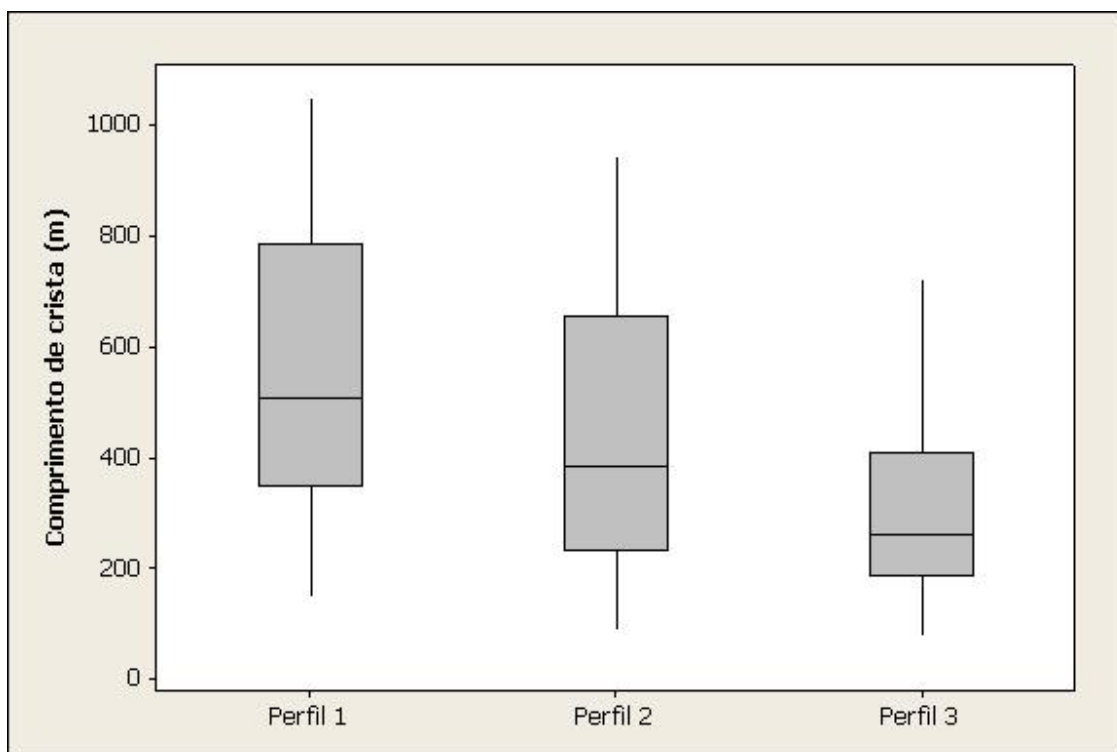


Figura 25. Gráfico em caixas (*boxplot*) de comprimento de crista para todos os perfis do campo de dunas de Tutoia. Notar queda da mediana e do intervalo interquartis do perfil 1 para o 3.

5.2.4 Ilha do Caju

No campo de dunas da Ilha do Caju, dois perfis, designados 1 e 2, de SE para NW (Figura 26), foram estudados para análise dos parâmetros de Ewing *et al.* (2006).

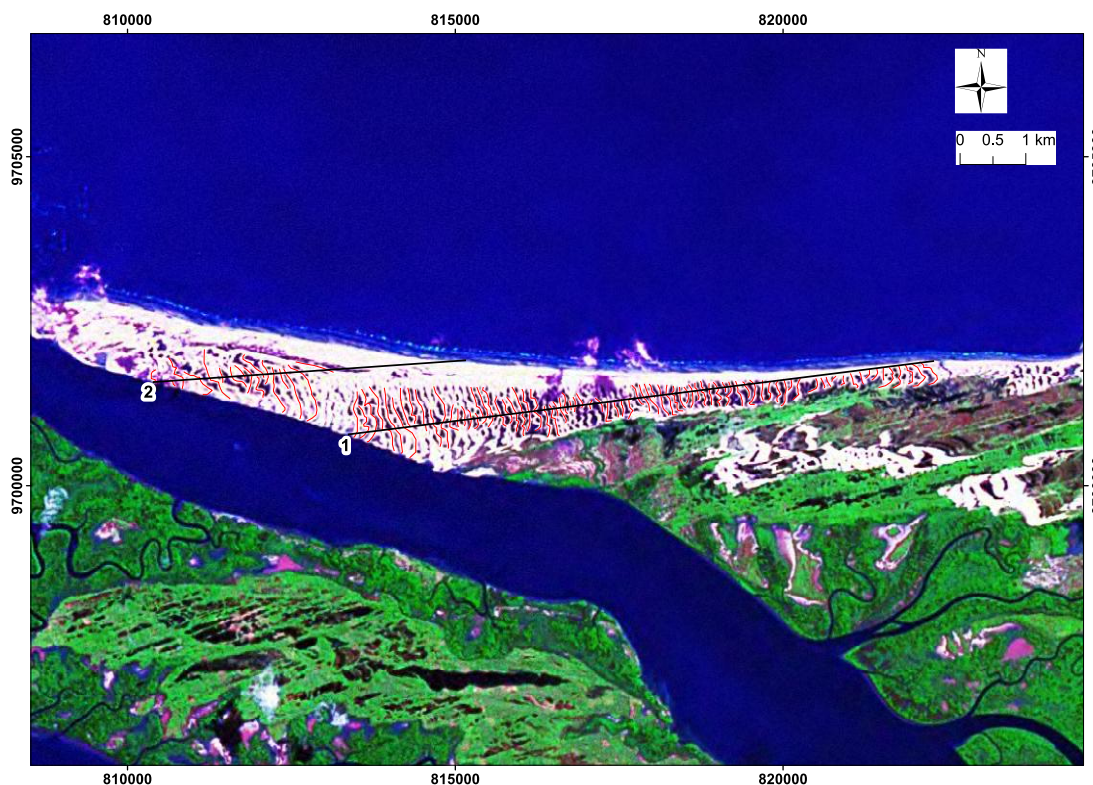


Figura 26. Dois perfis (linhas em preto 1 a 2, orientadas de NE para SW) traçados para quantificação de parâmetros morfoplanimétricos de Ewing *et al.* (2006) no campo de dunas da Ilha do Caju. Linhas finas laranjas correspondem às cristas de dunas mapeadas.

As figuras 27 a 30 apresentam os resultados de comprimento de crista e distância intercristas obtidos para os dois perfis. A Figura 27 indica ausência da tendência, prevista por Ewing *et al.* (2006), de aumento do espaçamento entre cristas com a elevação da distância à praia. A outra tendência relatada no modelo, de aumento do comprimento de crista com a elevação dessa distância, é melhor representada, com base nos valores de r e erro I, pelo perfil 1 (Figura 28).

Tendências de variação dos parâmetros morfoplanimétricos de SE para NW são de aumento do espaçamento intercristas (Figura 29) e do comprimento de crista (Figura 30).

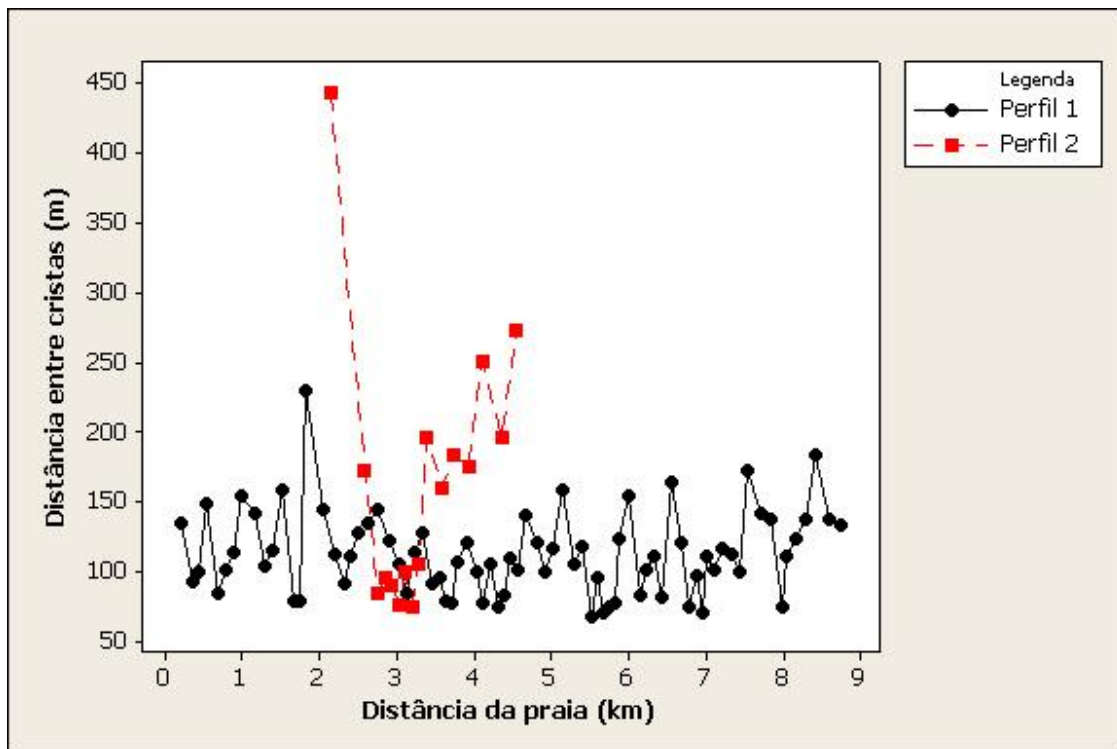


Figura 27. Gráfico de dispersão entre medidas de distância intercristas e distância crista-praia, para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 -0,007, com erro I de 0,951 ou 95,1 %; e r_2 de 0,074, com erro I de 0,786 ou 78,6 %.

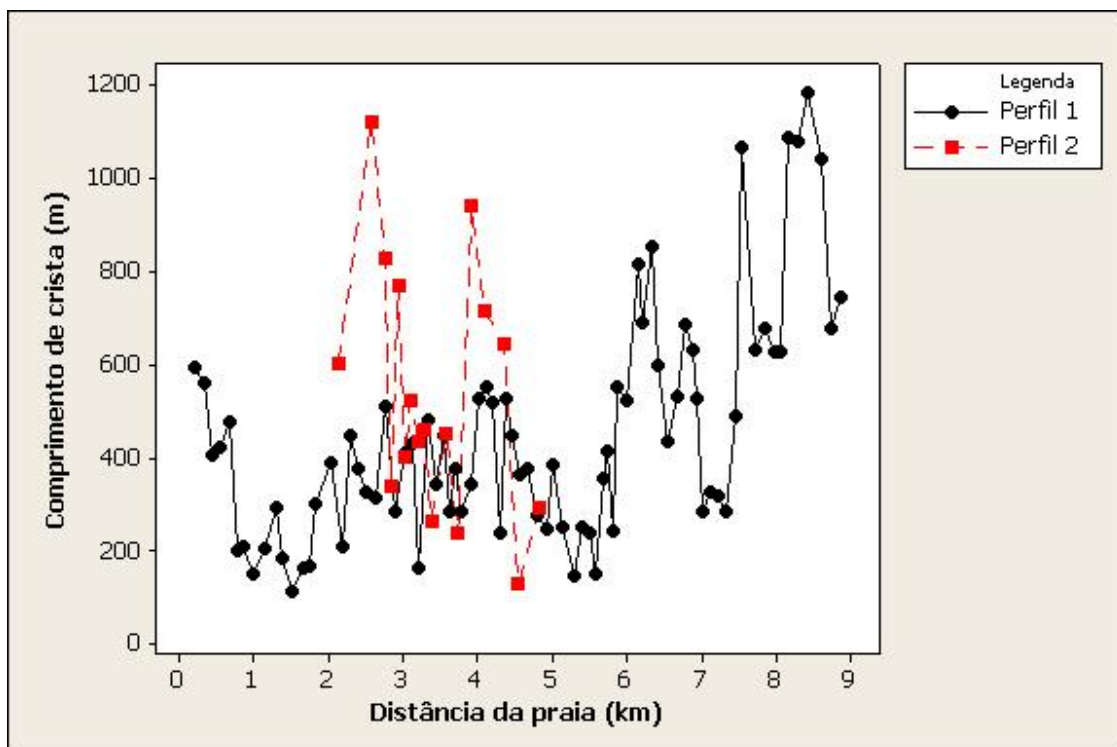


Figura 28. Gráfico de dispersão entre medidas de comprimento de crista e distância crista-praia, para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju. Os valores de regressão linear de cada perfil (r_n) e respectivo erro I são: r_1 0,582, com erro I de 0,000 ou 0,00 %; e r_2 -0,363, com erro I de 0,152 ou 15,2 %.

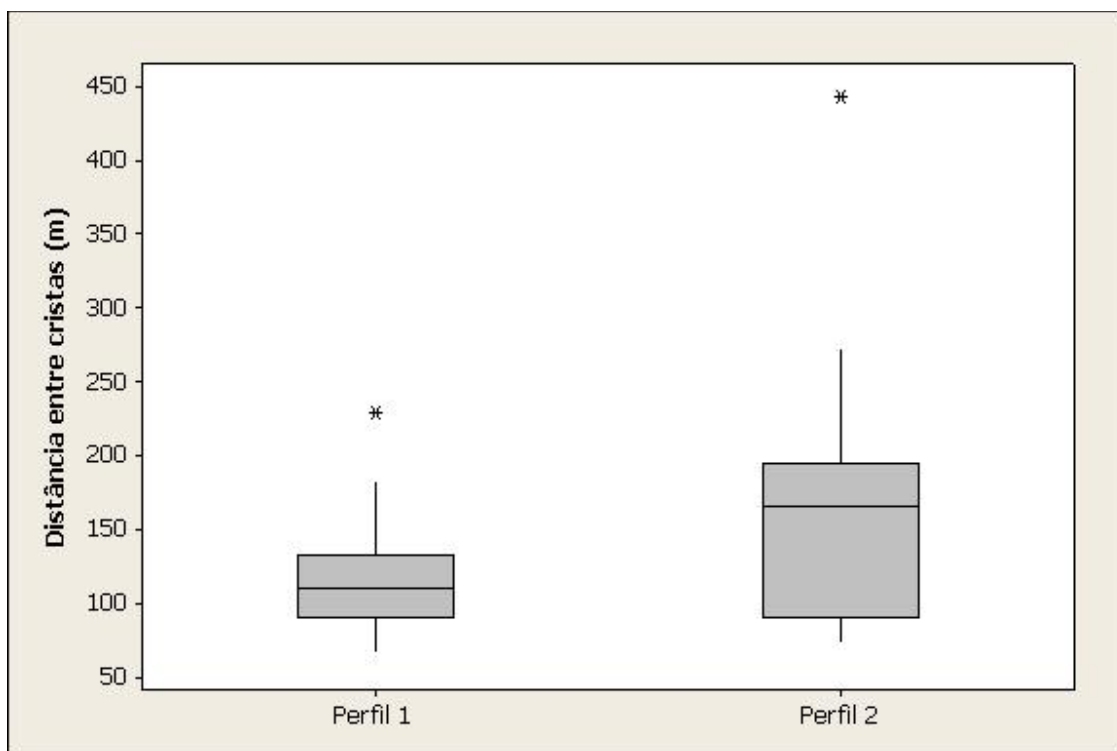


Figura 29. Gráfico em caixas (*boxplot*) de distância entre cristas para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju.

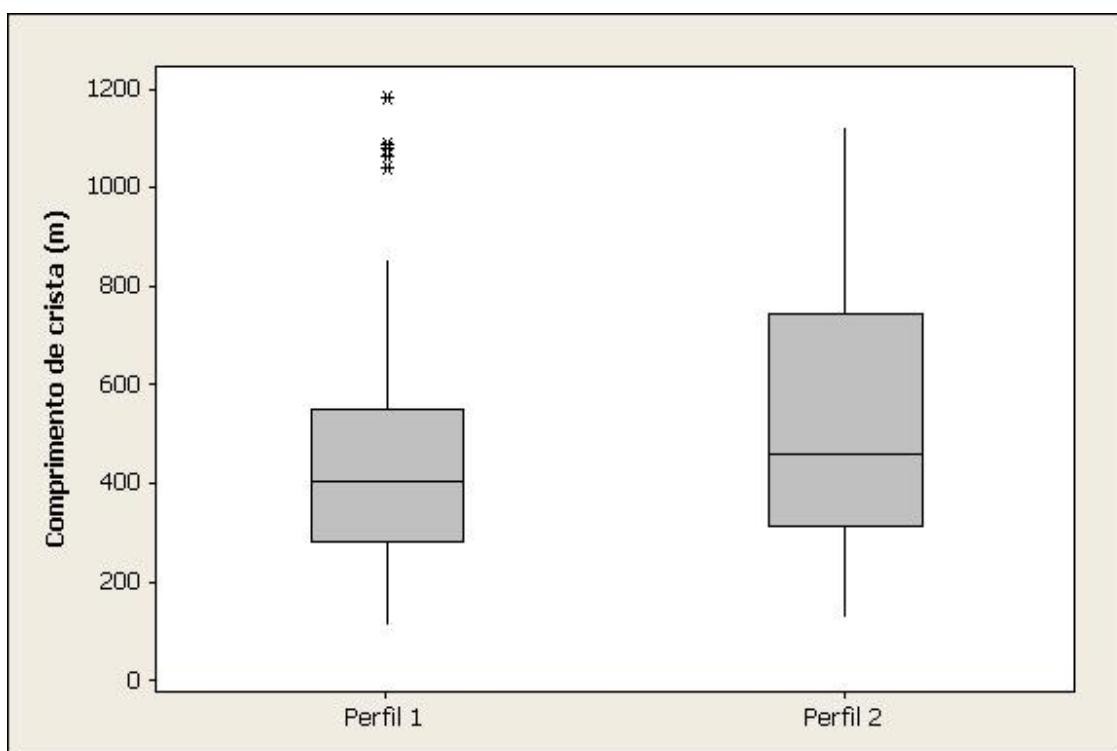


Figura 30. Gráfico em caixas (*boxplot*) de comprimento de crista para os dois perfis do campo de dunas da Ilha do Caju.

5.3 Sedimentologia

Foram analisadas quanto a granulometria 35 amostras dos dois campos de dunas estudados, cujos resultados se encontram nas tabelas 1, 2, e 3.

Tabela 1. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, das amostras dos Lençóis Maranhenses.

<i>Amostra</i>	<i>Tipo</i>	Diâmetro Médio	Desvio Padrão	Assimetria
LMA – 1	Duna	2.29	0.61	0.00
LMA – 2	Duna	2.32	0.53	-0.01
LMA – 3	Duna	1.75	0.40	0.02
LMA – 4	Duna	2.32	0.50	0.05
LMA – 5	Duna	2.10	0.49	0.06
LMA – 6	Duna	1.92	0.57	0.08
LMA – 7	Duna	2.29	0.56	0.15
LMA – 8	Duna	1.77	0.44	0.04
LMA – 12	Duna	2.26	0.55	0.10
LMA – 13	Duna	2.39	0.57	0.11
LMA – 14	Duna	1.95	0.70	0.38
LMA – 15	Duna	2.04	0.59	0.28
LMA – 16	Duna	1.89	0.36	0.02
LMA – 17	Duna	1.89	0.45	0.03
S3	Duna	1.77	0.52	0.01
S4	Duna	2.39	0.43	0.05
S5	Duna	2.09	0.44	0.05
MÁXIMO	Duna	2.39	0.70	0.38
MÍNIMO		1.75	0.36	-0.01
MÉDIA		2.08	0.51	0.08
DESVIO PADRÃO		0.22	0.08	0.10
LMA – 9	Praia	1.50	0.39	0.01
LMA – 10	Praia	1.96	0.58	-0.07
LMA – 11	Praia	2.20	0.41	0.01
S1	Praia	2.83	0.42	0.01
S2	Praia	1.60	0.51	0.05
MÁXIMO	Praia	2.83	0.58	0.05
MÍNIMO		1.50	0.39	-0.07
MÉDIA		2.02	0.46	0.00
DESVIO PADRÃO		0.53	0.08	0.04

As estatísticas de Pearson da distribuição granulométrica permitiram classificar nominalmente as amostras das praias dos Lençóis Maranhenses (Tabela 1), de acordo com os critérios de Folk & Ward (1957), como areias finas a médias, bem a moderadamente selecionadas e simétricas. Elas pouco diferem das areias das dunas eólicas, as quais são ligeiramente (0,06 phi) mais finas, pior selecionadas (desvio padrão 0,05 phi maior) e pouco (0,08) mais positivas na média.

Tabela 2. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, das amostras dos Pequenos Lençóis Maranhenses.

<i>Amostras</i>	<i>Tipo</i>	Diâmetro Médio	Desvio Padrão	Assimetria
<i>PLM - 01</i>	Duna	1.92	0.63	-0.08
<i>PLM - 02</i>	Duna	2.41	0.50	0.05
<i>PLM - 03</i>	Duna	1.96	0.50	0.04
<i>PLM - 04 D</i>	Duna	1.73	0.50	0.05
<i>PLM - 05 D</i>	Duna	1.53	0.56	0.14
<i>PLM - 06 D</i>	Duna	2.60	0.56	0.00
<i>PLM - 07</i>	Duna	2.32	0.51	0.06
<i>PLM - 08</i>	Duna	2.32	0.45	0.04
<i>PLM - 10</i>	Duna	2.64	1.55	2.15
MÁXIMO	Duna	2.64	1.55	2.15
MÍNIMO		1.53	0.45	-0.08
MÉDIA		2.16	0.64	0.27
DESVIO PADRÃO		0.37	0.33	0.67
<i>PLM - 04 P</i>	Praia	2.23	0.61	0.04
<i>PLM - 05 P</i>	Praia	2.88	0.50	-0.08
<i>PLM - 06 P</i>	Praia	2.70	0.46	0.01
MÁXIMO	Praia	2.88	0.61	0.04
MÍNIMO		2.23	0.46	-0.08
MÉDIA		2.60	0.52	-0.01
DESVIO PADRÃO		0.27	0.06	0.05

Nos Pequenos Lençóis Maranhenses (Tabela 2), a areia das praias é, em média, 0,44 phi mais fina que a das dunas, e, semelhantemente aos Lençóis Maranhenses, melhor selecionada (desvio padrão 0,12 phi menor) e menos positiva (diferença de 0,28). Na classificação nominal, as areias de praia são bem selecionadas, diferentemente das de dunas, cuja seleção é apenas moderada. A distribuição granulométrica, tanto das areias de praia quanto das de dunas, é simétrica. A amostra coletada no rio Preguiças (Tabela 3) tem diâmetro médio na mesma classe granulométrica média das praias e dunas estudadas (areia fina), com seleção boa e distribuição de assimetria positiva.

Tabela 3. Estatísticas da distribuição granulométrica, calculadas pela técnica analítica dos momentos de Pearson, da amostra retirada no médio curso do rio Preguiças.

<i>Amostras</i>	Diâmetro Médio	Desvio Padrão	Assimetria
PRE - 04	2.05	0.64	0.19

Os resultados de ensaios de separação de minerais quanto a densidade e suscetibilidade magnética (Tabela 4) mostram teor médio em massa de minerais pesados na fração areia muito fina de 4,60%, com amplitude de variação total entre 0,01% e 26,70%. Dentro desta fração, os magnéticos representam em média 40,86% em massa, variando de 0,00% a 75,96%. A correlação negativa observada entre diâmetro médio em phi e teor em massa de minerais pesados na fração areia muito fina é baixa ($r=-0,037$) e pouco

consistente estatisticamente (erro I de 0,4). Assim, pode-se considerar que, nos resultados deste estudo, o tamanho dos grãos não influencia de modo significativo a quantidade de minerais pesados.

Tabela 4. Resultados de ensaios de separação de minerais leves e pesados na classe granulométrica areia muito fina, por flutuação-afundamento em líquido denso, e de minerais magnéticos da fração pesada, por atração ao ímã portátil.

Amostras	Separação ao bromofórmio Proporção em massa (%) no ensaio		Separação ao ímã portátil Proporção em massa (%) na fração pesada	
	Minerais pesados	Minerais leves	Magnéticos	Não magnéticos
LMA – 1	0.01%	99.99%	0.00%	100.00%
LMA – 2	0.22%	99.78%	61.99%	38.01%
LMA – 3	3.76%	96.24%	10.34%	89.66%
LMA – 4	6.16%	93.84%	71.34%	28.66%
LMA – 5	6.11%	93.89%	70.80%	29.20%
LMA - 6	0.89%	99.11%	46.28%	53.72%
LMA - 7	20.69%	79.31%	59.79%	40.21%
LMA - 8	0.66%	99.34%	0.00%	100.00%
LMA - 9	2.08%	97.92%	0.00%	100.00%
LMA - 10	26.70%	73.30%	46.11%	53.89%
LMA - 11	0.11%	99.89%	0.00%	100.00%
LMA - 12	4.57%	95.43%	15.74%	84.26%
LMA - 13	13.83%	86.17%	48.50%	51.50%
LMA - 14	3.06%	96.94%	75.96%	24.04%
LMA - 15	2.44%	97.56%	65.15%	34.85%
LMA - 16	2.63%	97.37%	48.15%	51.85%
LMA - 17	9.44%	90.56%	0.00%	100.00%
PLM - 1	0.12%	99.88%	18.52%	81.48%
PLM - 2	1.84%	98.16%	32.29%	67.71%
PLM - 3	0.40%	99.60%	0.00%	100.00%
PLM - 4 - P	1.07%	98.93%	50.79%	49.21%
PLM - 4 - D	18.56%	81.44%	66.03%	33.97%
PLM - 5 - P	0.31%	99.69%	72.43%	27.57%
PLM - 5 - D	2.14%	97.86%	35.96%	64.71%
PLM - 6 - P	0.36%	99.64%	58.21%	41.79%
PLM - 6 - D	1.63%	98.37%	57.45%	42.55%
PLM - 7	4.30%	95.70%	46.79%	53.21%
PLM - 8	0.61%	99.39%	44.32%	55.68%
PLM - 10	0.95%	99.05%	51.79%	48.21%
S1	0.34%	99.66%	54.28%	45.72%
S2	9.60%	90.40%	49.32%	50.68%
S3	3.35%	96.65%	18.57%	81.43%
S4	9.51%	90.49%	44.56%	55.44%
S5	2.30%	97.70%	50.21%	49.79%
ST 3	7.98%	92.02%	21.05%	78.95%
PRE - 3	1.23%	98.77%	68.57%	31.43%
PRE - 4	0.26%	99.74%	50.39%	49.61%
MÍNIMO	0.01%	73.30%	0.00%	24.04%
MÁXIMO	26.70%	99.99%	75.96%	100.00%
MÉDIA	4.60%	95.40%	40.86%	59.16%
DESVIO PADRÃO	6.27	6.27	0.24	0.24

5.4 Minerais pesados

O mineral transparente não micáceo mais comum nas lâminas de grãos pesados é o zircão (Figura 31), com 47 % de concentração em média (

Tabela 5). Em menor quantidade, porém sempre presentes, ocorrem rutilo (Figura 32), hornblenda (Figura 33) e turmalina (Figura 34). Os minerais acessórios mais significativos são sillimanita (incluindo variedade fibrosa - Figura 35), estaurolita, epídoto e cianita (Figura 36).

A cianita demonstra-se bom indicador de área fonte. Nas amostras de praia do Estado do Piauí (LM-61, LM-58 e LM-59), sua concentração média é de 17 %, em contraste às do rio Parnaíba (LM-28 e LM-35), onde é de apenas 1,5 %. Nas areias eólicas de Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis, esta concentração fica entre 5 % e 6 %, respectivamente, valores intermediários entre os da costa piauiense e as do rio Parnaíba, o que permite interpretar contribuição, para o sistema eólico, dos sedimentos provenientes da costa a leste da foz do rio Parnaíba (incluindo costa do Piauí), trazidos por deriva litorânea longitudinal.

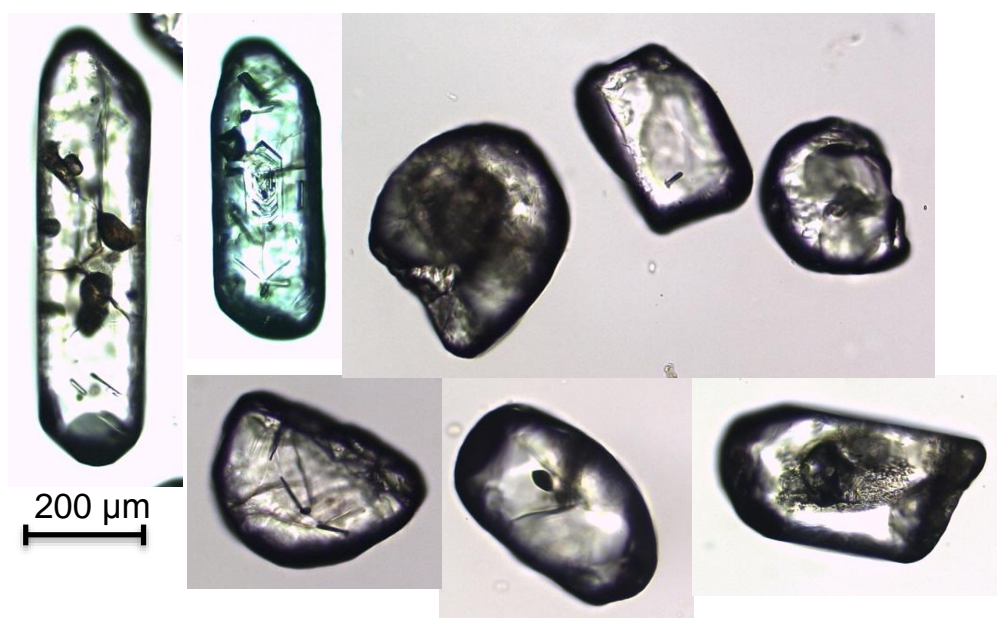


Figura 31. Fotomicrografias de grãos de zircão, mineral pesado mais comum nos sedimento estudados. Notar grande diversidade de formas, desde euédrica prismática bipiramidada (à esquerda) até anédrica arredondada, ovoide (imagem central da linha superior).

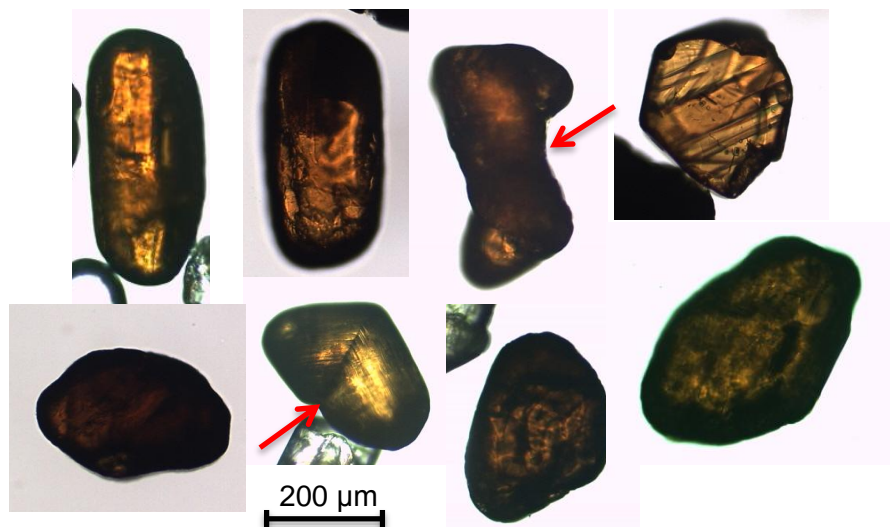


Figura 32. Fotomicrografias de grãos de rutilo, nas suas formas mais comumente encontradas. Notar geminações em cotovelo e polissintéticas.

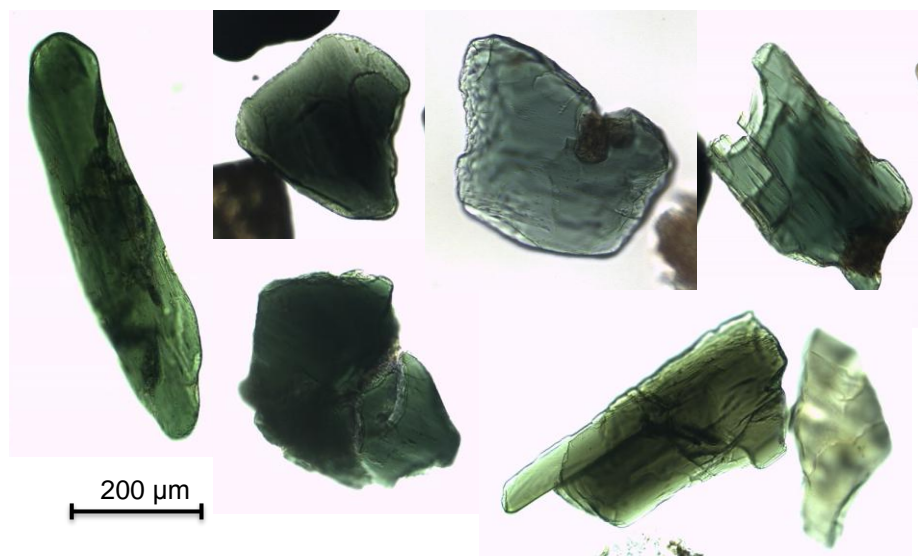


Figura 33. Fotomicrografias de hornblenda, nas diversas formas observadas em lâmina. Notar predomínio de formas subédricas prismáticas ou lamelares.

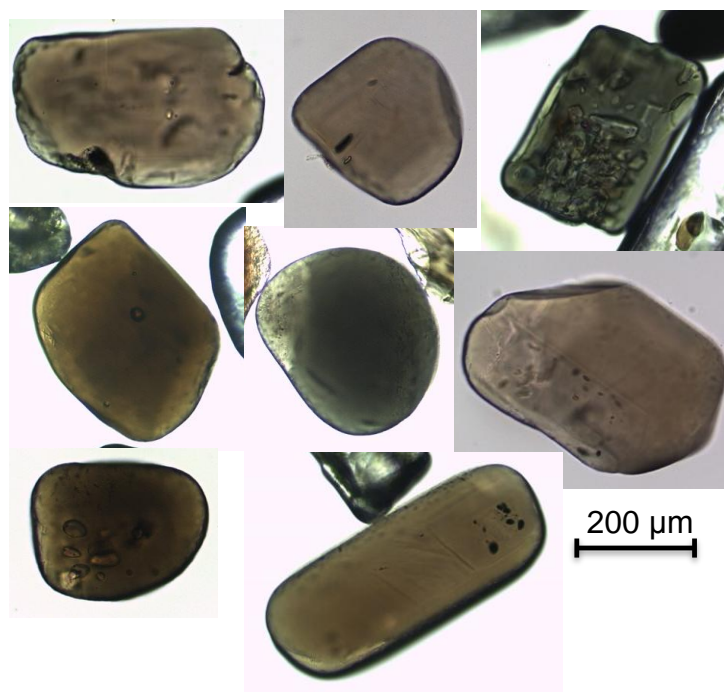


Figura 34. Fotomicrografias de grãos de turmalina, Notar pouca variação de cor e domínio de formas subédricas prismáticas, subarredondadas. Grão subcircular, no centro, corresponde à seção basal.

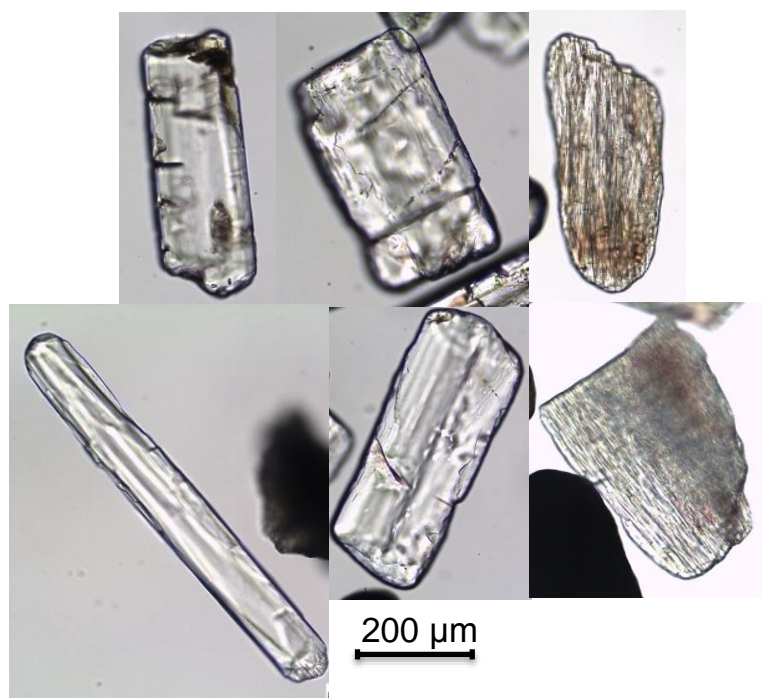


Figura 35. Sillimanita, nas formas mais comumente observadas nos sedimentos estudados. Notar variedade fibrosa (agregados de cristais aciculares), nas duas imagens da direita.

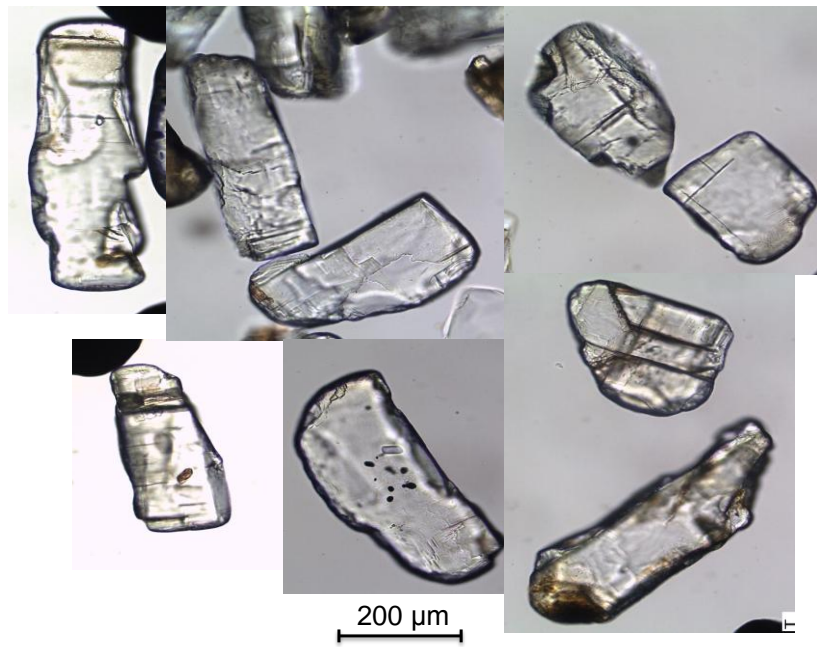


Figura 36. Cianita, nas formas mais comuns nos sedimentos analisados.

Tabela 5. Resultados da quantificação de minerais pesados de cada amostra, em valores percentuais de contagem ao microscópio petrográfico.

Lâminas	Opacos	Zircão	Rutilo	Hornblenda	Turmalina	Sillimanita	Sillimanita Fibrosa	Estaurolita	Epidoto	Cianita	Anatásio	Apatita	Andalusita
LMA - 1	50%	50%	6%	5%	6%	3%	0%	11%	13%	6%	0%	0%	0%
LMA - 2	25%	9%	9%	15%	19%	17%	5%	8%	2%	18%	0%	0%	1%
LMA - 3	33%	51%	15%	7%	6%	1%	3%	6%	8%	1%	1%	2%	0%
LMA - 4	8%	65%	14%	10%	5%	1%	0%	3%	3%	1%	0%	0%	0%
LMA - 5	29%	63%	12%	1%	12%	0%	0%	6%	0%	5%	0%	0%	0%
LMA - 6	32%	38%	8%	3%	33%	2%	0%	9%	2%	4%	0%	0%	0%
LMA - 7	22%	70%	18%	2%	4%	3%	0%	2%	1%	1%	0%	0%	0%
LMA - 8	54%	47%	15%	5%	16%	5%	2%	6%	0%	4%	0%	0%	0%
LMA - 9	60%	42%	11%	14%	19%	1%	0%	3%	3%	7%	0%	0%	0%
LMA - 10	33%	76%	15%	0%	4%	3%	0%	0%	3%	1%	0%	0%	0%
LMA - 11	35%	70%	5%	0%	5%	2%	1%	9%	3%	6%	0%	0%	0%
LMA - 12	50%	71%	12%	1%	5%	1%	0%	5%	1%	3%	0%	0%	0%
LMA - 13	45%	62%	14%	2%	8%	1%	0%	3%	1%	9%	0%	0%	0%
LMA - 14	37%	58%	16%	1%	11%	0%	0%	6%	2%	4%	0%	0%	0%
LMA - 15	27%	60%	17%	4%	8%	2%	0%	2%	3%	3%	0%	0%	0%
LMA - 16	37%	36%	19%	3%	13%	7%	0%	11%	1%	10%	0%	0%	0%
LMA - 17	45%	51%	10%	3%	19%	2%	0%	7%	3%	4%	0%	0%	1%
PLM - 1	43%	33%	14%	12%	14%	4%	4%	6%	5%	7%	0%	0%	2%
PLM - 2	28%	34%	11%	23%	9%	2%	0%	5%	10%	6%	0%	0%	0%
PLM - 3	50%	22%	13%	20%	14%	5%	4%	6%	5%	11%	0%	0%	0%
PLM - 4 - P	36%	56%	9%	6%	13%	1%	0%	1%	7%	7%	0%	0%	0%
PLM - 4 - D	46%	54%	10%	5%	12%	6%	0%	3%	6%	1%	0%	0%	4%
PLM - 5 - P	23%	21%	3%	31%	7%	9%	5%	2%	13%	9%	0%	0%	0%
PLM - 5 - D	80%	51%	18%	2%	10%	7%	0%	4%	1%	7%	0%	0%	0%
PLM - 6 - P	41%	22%	5%	35%	7%	10%	4%	3%	12%	2%	0%	0%	0%
PLM - 6 - D	32%	46%	15%	11%	14%	8%	0%	1%	1%	3%	0%	0%	0%
PLM - 7	28%	53%	15%	12%	8%	1%	0%	1%	6%	3%	0%	0%	0%
PLM - 8	50%	22%	7%	30%	19%	8%	2%	3%	5%	5%	0%	0%	0%
PLM - 10	44%	57%	17%	2%	9%	3%	0%	4%	1%	6%	0%	0%	0%
S1	28%	15%	4%	26%	14%	9%	6%	3%	11%	11%	0%	0%	1%
S2	55%	71%	9%	1%	8%	2%	0%	4%	1%	4%	0%	0%	0%
S3	42%	48%	7%	2%	24%	3%	0%	10%	1%	5%	0%	0%	0%
S4	36%	74%	17%	0%	4%	2%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%
S5	29%	48%	19%	3%	15%	2%	0%	6%	0%	6%	0%	0%	0%
PRE - 04	30%	9%	4%	21%	19%	16%	4%	8%	9%	7%	0%	1%	0%
LM - 28	21%	69%	19%	0%	6%	1%	0%	0%	0%	1%	2%	1%	0%
LM - 35	20%	59%	24%	0%	7%	1%	0%	0%	0%	2%	2%	4%	0%
LM - 58	10%	17%	10%	9%	8%	15%	4%	7%	4%	24%	0%	0%	2%
LM - 59	8%	50%	10%	2%	4%	8%	0%	6%	1%	17%	0%	0%	1%
LM - 61 (F)	11%	45%	5%	5%	8%	8%	5%	7%	1%	13%	0%	0%	4%
LM - 61 (G)	18%	51%	9%	3%	3%	6%	4%	4%	2%	14%	0%	0%	3%
MÉDIA	35%	47%	12%	8%	11%	5%	1%	5%	4%	6%	0%	0%	0%

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Sensoriamento remoto

Os valores do espaçamento intercristas e de comprimento de cristas são maiores nos Lençóis Maranhenses do que nos demais campos de dunas estudados (Figuras 37 e 38). Esta diferença pode ser atribuída à maior área dos Lençóis Maranhenses. Campos de dunas menores são mais afetados pelos limites ou fronteiras da área, segundo Ewing & Kocurek (2010), o que desfavorece o desenvolvimento dos padrões evolutivos tempo-espaciais considerados por esses autores indicativos de maturação do sistema, como crescimento de comprimento de crista e de distância intercristas.

Outra condição limite definida por Ewing & Kocurek (2010), além do tamanho do campo de dunas, é a geometria da área fonte. Por se tratar de campos de dunas costeiras, os campos estudados deveriam possuir em tese área fonte principal na praia, de geometria linear. Entretanto, os resultados não apresentaram as tendências de variação progressiva ao longo do campo de dunas, previstas, de acordo com o modelo daqueles autores, para o caso de fontes sedimentares lineares. A ausência de padrão bem definido de variação dos parâmetros ao longo dos dois campos é mais compatível com o modelo teórico de fonte plana. Isso pode ser explicado, no caso dos Lençóis Maranhenses, pelo intenso retrabalhamento das dunas por córregos ativos nos períodos de chuva, e no caso de Pequenos Lençóis e Tutoia, pelo papel exercido pela planície de deflação como fonte secundárias de sedimentos. Outro fator que pode contribuir para este efeito nos Lençóis Maranhenses é a inundação extensiva das depressões interdunas durante a estação chuvosa, época em que o retrabalhamento eólico fica restrito às cristas dunares. O material retrabalhado das cristas é lançado nas interdunas inundadas, onde, na estação seca seguinte, atua como fonte de areia para as dunas a sotavento. Esta troca lenta de areia entre dunas e interdunas, recorrente ao longo dos ciclos estacionais, deve contribuir para a geometria plana da fonte sedimentar do campo de dunas. Uma explicação alternativa para os resultados anômalos de variação dos parâmetros encontrado nos Lençóis Maranhenses é o baixo grau de evolução morfológica desse campo de dunas, isto é, o seu padrão de auto-organização ainda incompleto ou incipiente. Essa interpretação é coerente com a tipologia deste campo de dunas de acordo com a classificação morfodinâmica de sistemas eólicos costeiras proposta por Giannini (2007) e Giannini *et al.* (2011), onde Lençóis Maranhenses encaixa-se no estágio 8, isto é, de configuração de equilíbrio ainda não alcançada, segundo esses autores. Desse modo, a área e configuração interna (distribuição de associações de formas deposicionais) do campo de dunas não teriam ainda atingido suas dimensões de equilíbrio.

Para os Pequenos Lençóis Maranhenses, um terceiro fator para ausência de padrão bem definido de variação dos parâmetros ao longo desse campo seria a limitação exercida pelo rio Preguiças ao avanço do campo de dunas o que aparenta influenciar nos valores de comprimento de crista. O rio Preguiças barra o avanço do campo de dunas nos dois perfis mais ocidentais o que, localmente, aumenta o saldo influxo-efluxo e, consequentemente, forma cadeias barcanoides mais extensas. O mesmo ocorre no campo de Tutoia devido ao rio Cangatá, cuja influência pode ser notada com mais intensidade nos primeiros dois perfis a SE.

Outro fator para a não verificação das tendências de Ewing *et al.* (2006) seria que, de acordo com Ewing & Kocurek (2010), o máximo espaçamento de dunas, mantidas fixas as outras variáveis, se dá quando o comprimento do campo de dunas é cinco vezes maior do que a sua largura. Essa condição não é observada em nenhum dos campos estudados, os quais, inversamente, se caracterizam por apresentar largura maior que comprimento.

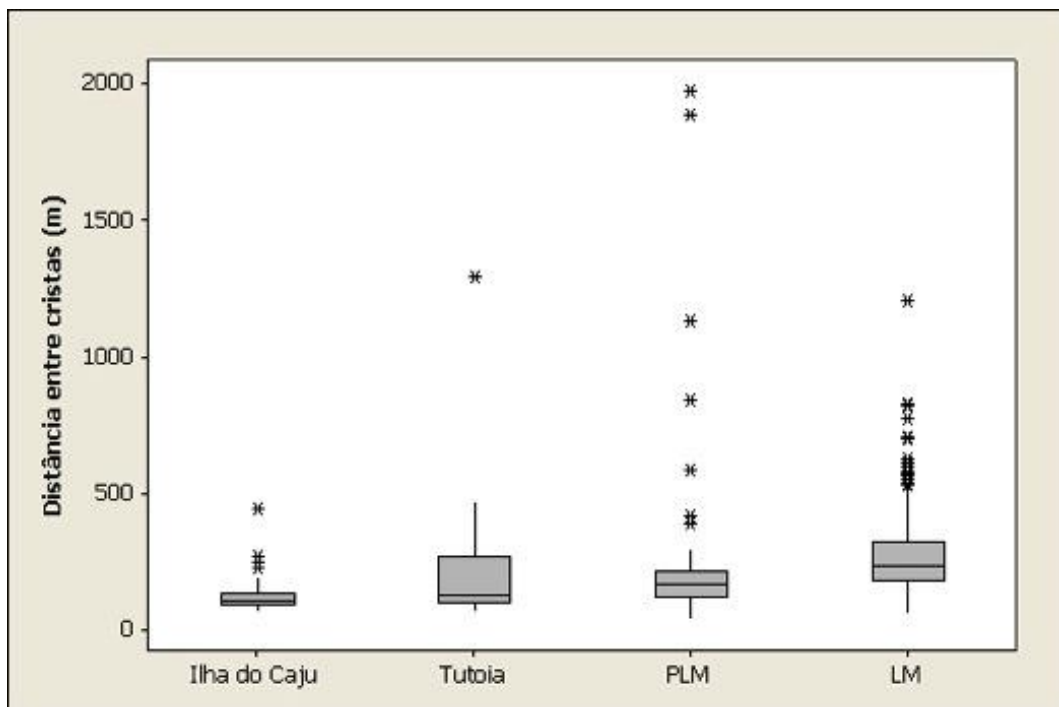


Figura 37. Gráfico em caixas (*boxplot*) com todos os valores de distância intercristas para os campos de dunas eólicos de Ilha do Caju, Tutoia, Pequenos Lençóis (PLM) e Lençóis Maranhenses (LM).

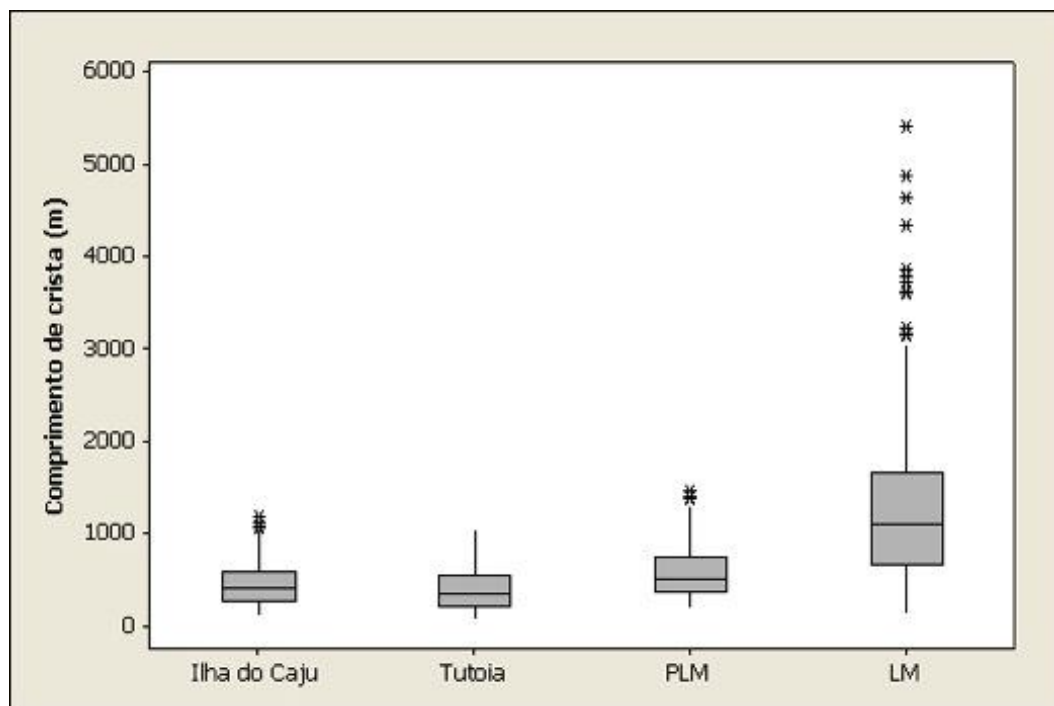


Figura 38. Gráfico em caixas (*boxplot*) com todos os valores de comprimento de crista dos campos de dunas eólicas de Ilha do Caju, Tutoia, Pequenos Lençóis (PLM) e Lençóis Maranhenses (LM). Notar tendência para maiores valores em LM.

6.2 Sedimentologia

O exame do mapa de isovalores de diâmetro médio para os dois campos de dunas (Figura 39) permite observar tendência pouco definida de afinamento da granulometria para o interior do sistema eólico. De acordo com o método de McLaren & Bowles (1985) de interpretação de rumos de transporte baseada no padrão de variação espacial de estatísticas da distribuição granulométrica, a tendência prevista, no caso de afinamento, é de melhora de seleção com queda de assimetria. O padrão aqui observado, entretanto, ainda que pouco nítido, é de piora de seleção (Figura 40) e aumento de assimetria (Figura 41) para o interior do campo de dunas, isto é, as areias mais grossas, situadas preferencialmente próximo a fonte praial, apresentam-se melhor selecionadas e mais negativas do que as mais finas. O resultado obtido pode ser explicado pelo retrabalhamento das areias de dunas eólicas pelos rios temporários, de padrão morfodinâmico entrelaçado. Desse modo, o transporte fluvial superimposto melhoraria o grau de seleção rumo à costa, com transporte preferencial de grossos. Em suma, o padrão de dispersão sedimentar nos campos de dunas estudados refletiria a combinação complexa das influências de transporte eólico para SW e dos rios entrelaçados que cortam o campo de dunas para NE, estes particularmente ativos durante a estação chuvosa.

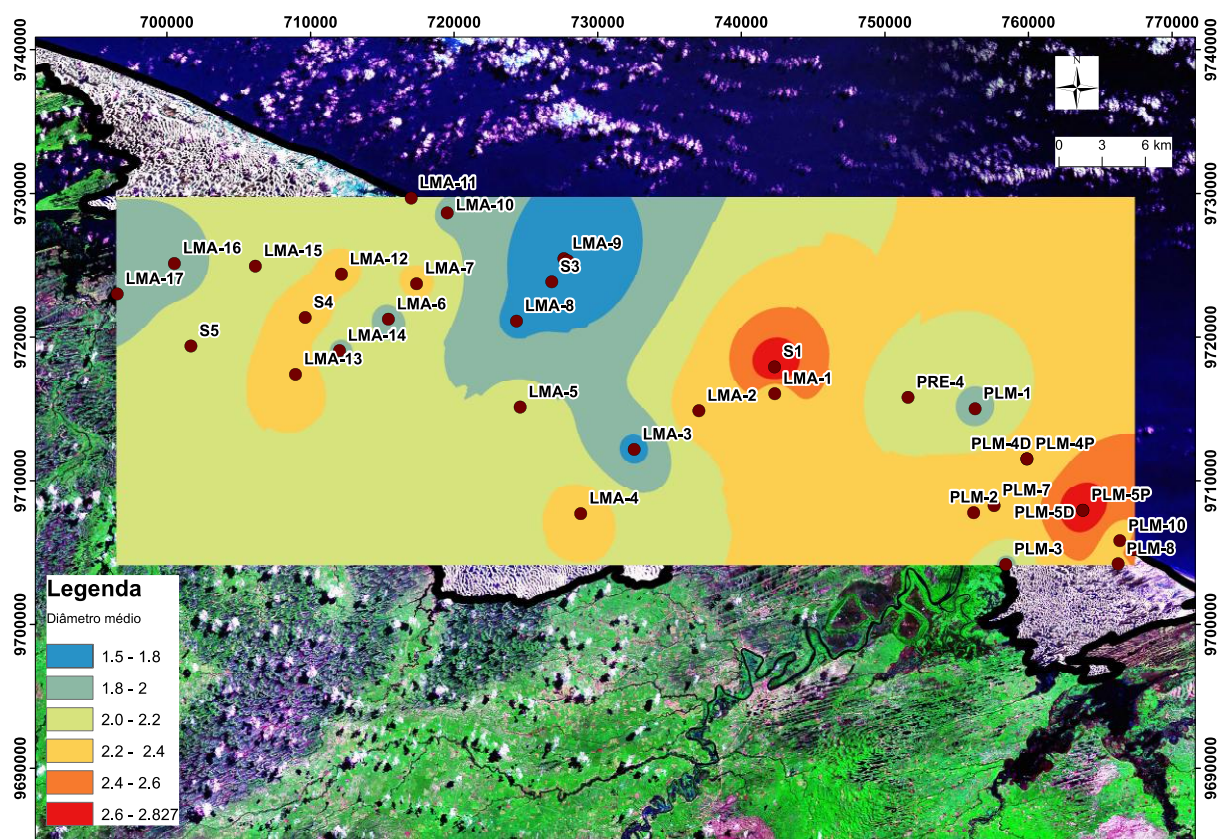


Figura 39. Valores de diâmetro médio (ϕ) interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.

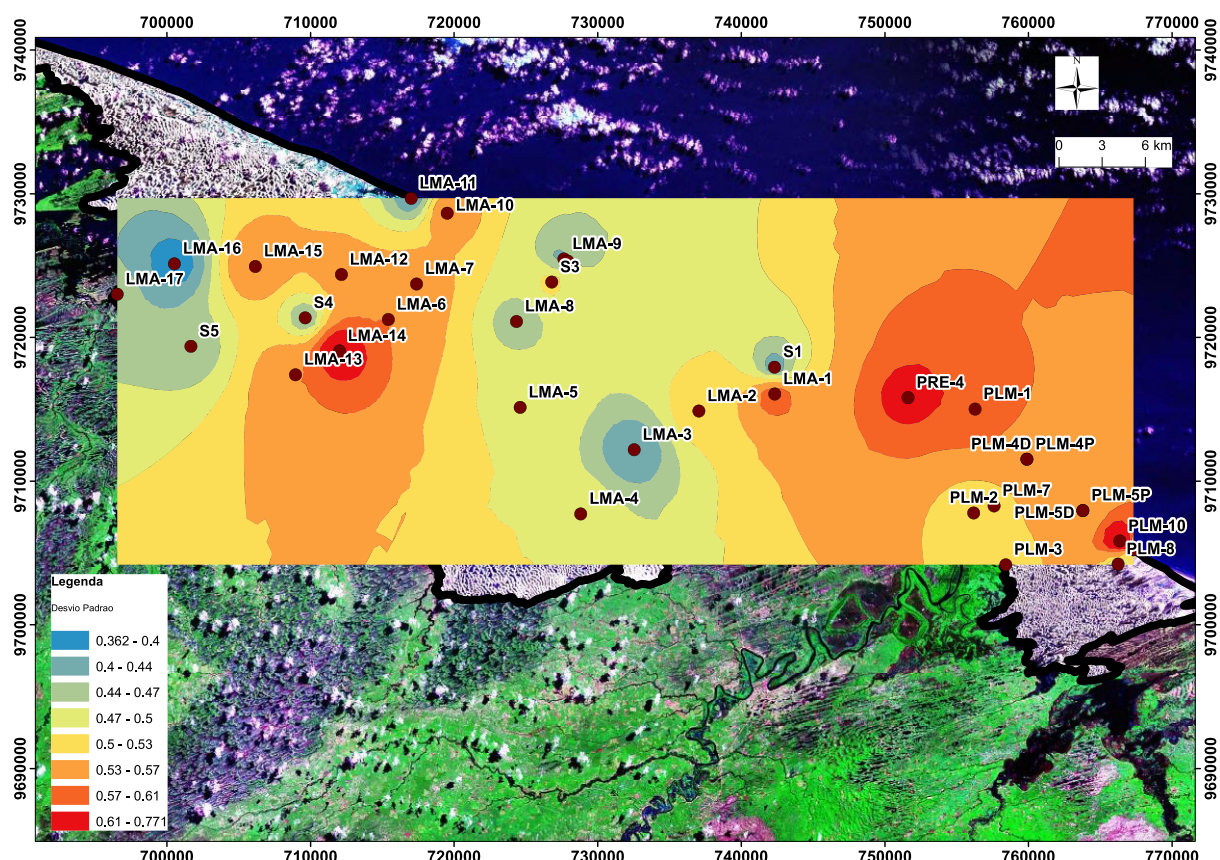


Figura 40. Valores de desvio padrão da distribuição granulométrica interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.

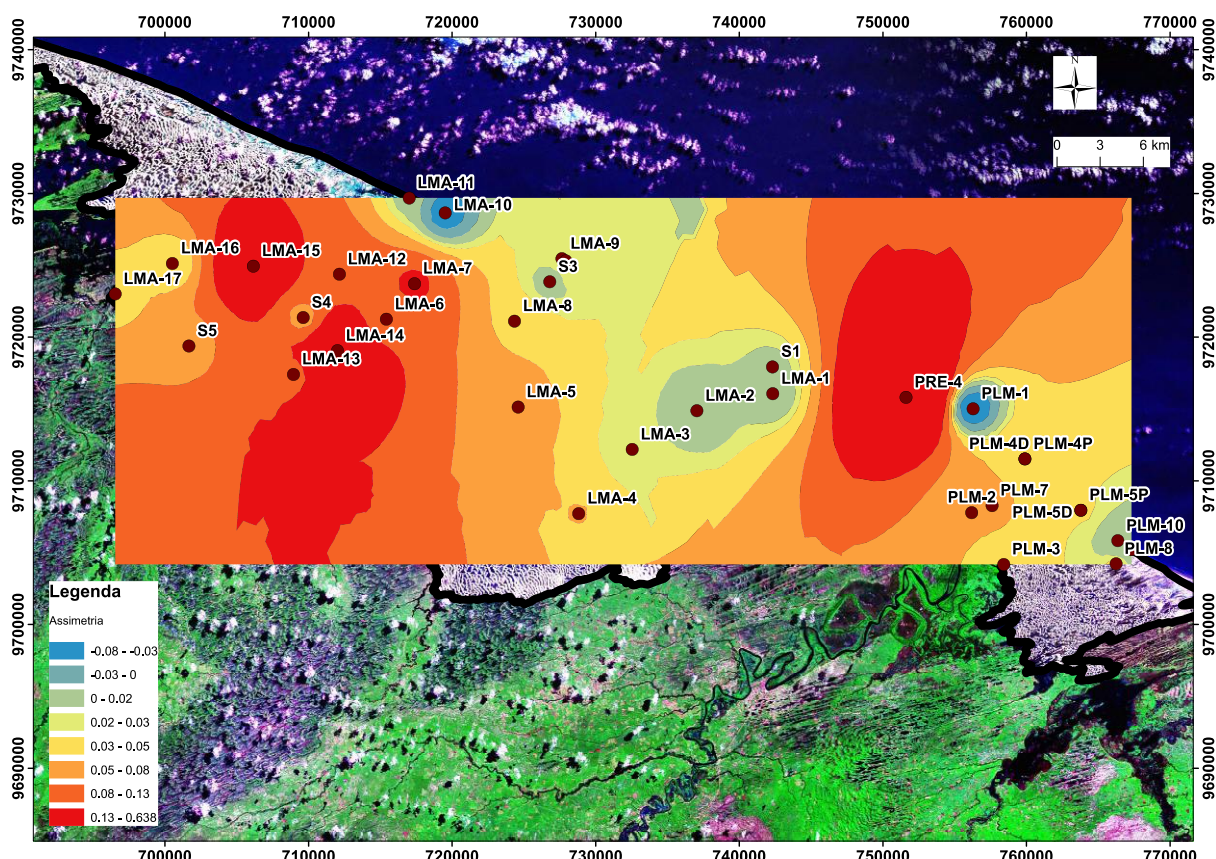


Figura 41. Valores de assimetria da distribuição granulométrica interpolados para os campos de dunas dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis.

6.3 Minerais pesados

A maior concentração de zircão e rutilo, minerais pesados de mais elevada densidade (“pesados pesados”), na porção distal do campo de dunas de Lençóis Maranhenses, ocorre em detrimento da concentração de minerais pesados menos densos (“pesados leves”), como turmalina, hornblenda, cianita e sillimanita (Figura 42). A tendência é bem exemplificada pelo perfil 1 (Figura 43). Este padrão sugere transporte seletivo de minerais pesados leves rumo à porção proximal do campo de dunas, o que pode ser atribuído, em consonância com a interpretação feita para os resultados granulométricos, ao retrabalhamento pelos rios que cortam o campo de dunas.

A concentração de minerais pesados leves diminui não somente da praia para o interior do campo de dunas, em cada perfil, como também entre os perfis (Figura 42), de SE (perfil 1) para NW (perfil 4), portanto no rumo do retrabalhamento combinado por deriva litorânea longitudinal, transporte eólico e transporte fluvial (Figura 44). Este padrão de variação é mais claro com hornblenda, que, além da facilidade de transporte, caracteriza-se pela instabilidade química. Considerando que tanto o transporte eólico para SW, quanto o retrabalhamento por rios internos ao campo de dunas, rumo N e NE, e a deriva longitudinal para NW deveriam, em tese, transportar preferencialmente, e portanto concentrar progressivamente, os minerais mais leves, o resultado encontrado permite sugerir que este

processo de transporte combinado envolva perda destes minerais, seja por transporte para fora do sistema praia - campo de dunas, seja por dissolução e/ou fragmentação.

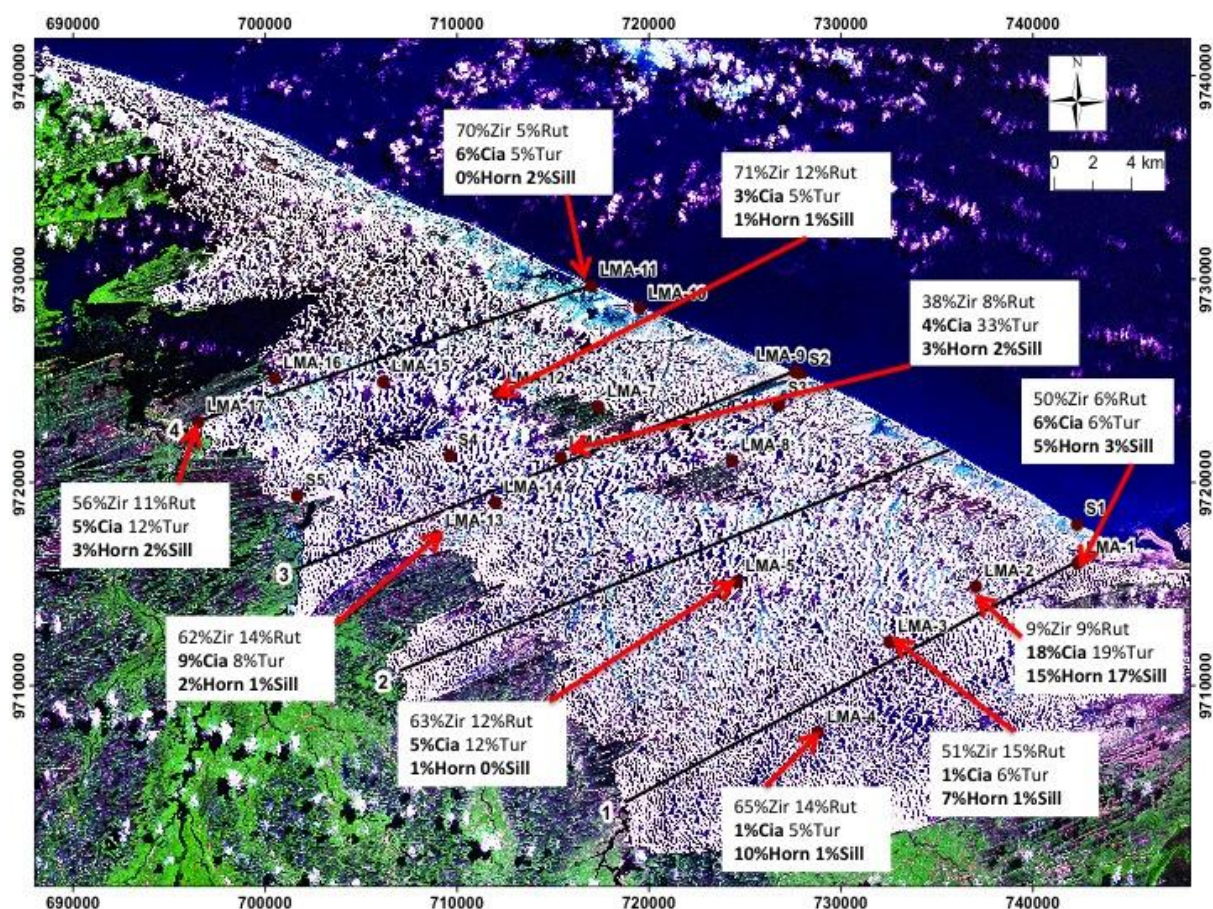


Figura 42. Variação espacial da assembleia quantitativa de minerais pesados no campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Todos os pontos representados são de depósitos eólicos, exceto LMA - 11, que é praia.

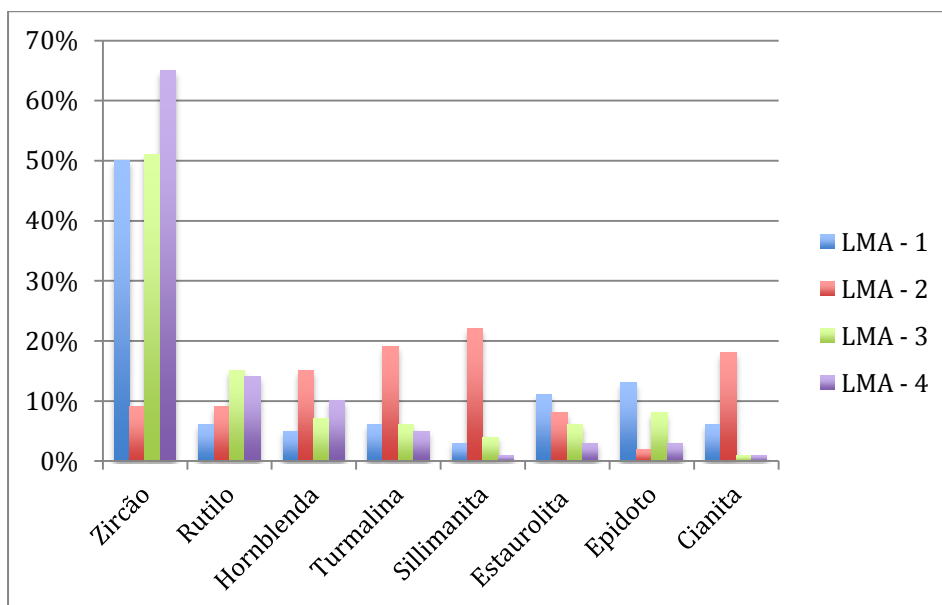


Figura 43. Gráfico de barras mostrando os principais minerais pesados presentes nas amostras do perfil 1 dos Lençóis Maranhenses, da porção mais proximal (amostra LMA-1) para a mais distal do campo de dunas (LMA-4). Notar que os valores dos minerais pesados de menor densidade e, portanto, menor equivalente hidráulico, como turmalina, sillimanita, estauroлита, epidoto e cianita, diminuem para o interior do campo de dunas (de LMA-1 para LMA-4, SE para NW), enquanto os de maior densidade e equivalente hidráulico, como zircão e rutila, aumentam.

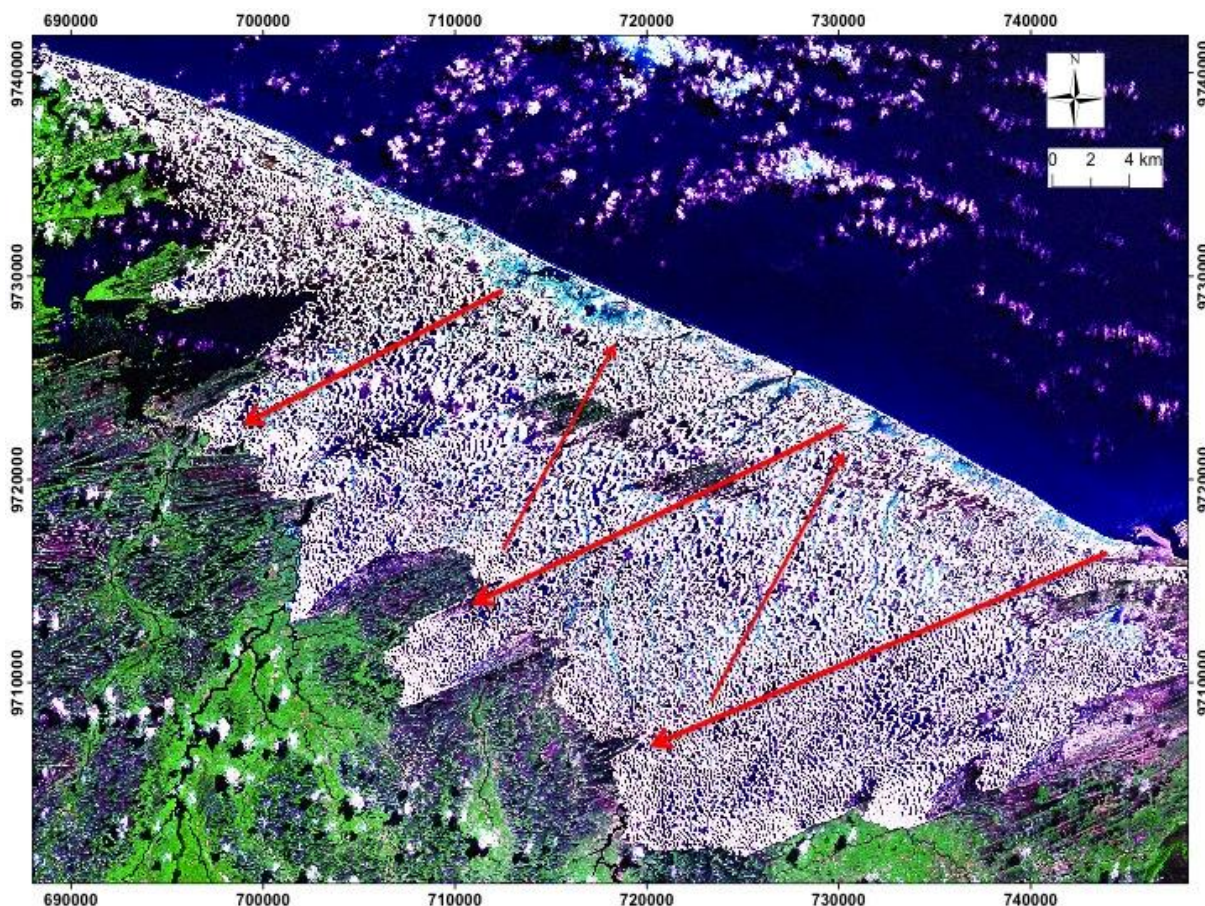


Figura 44. Figura exemplificando o mecanismo de retrabalhamento sedimentar exercido pela drenagem que atravessa o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. Os sedimentos carreados rumo SW pelo vento são levados pelos rios de volta à praia e daí transportados novamente pelo vento para o interior do campo de dunas. Orientação das setas rumo à costa desenhada de acordo com a direção aproximada dos rios principais cortando o campo de dunas.

Nos Pequenos Lençóis (Figura 45), ao contrário do observado nos Lençóis Maranhenses, as maiores concentrações de turmalina, cianita, hornblenda e sillimanita encontram-se na parte distal do campo de dunas, em detrimento de zircão e rutilo, que diminuem para o interior do sistema eólico. Este padrão de distribuição pode ser explicado mais uma vez pela seleção durante o transporte sedimentar, já que zircão e rutilo, por serem mais densos e, em média, mais equidimensionais, são mais difíceis de serem transportados. Só que, neste caso, o agente principal de seleção seria o próprio vento.

A assembleia mineralógica do rio Preguiças (PRE - 3) é semelhante à das amostras do interior do sistema eólico, o que pode ser atribuído ao fato observado de este rio demarcar e retrabalhar o limite interno do campo de dunas.

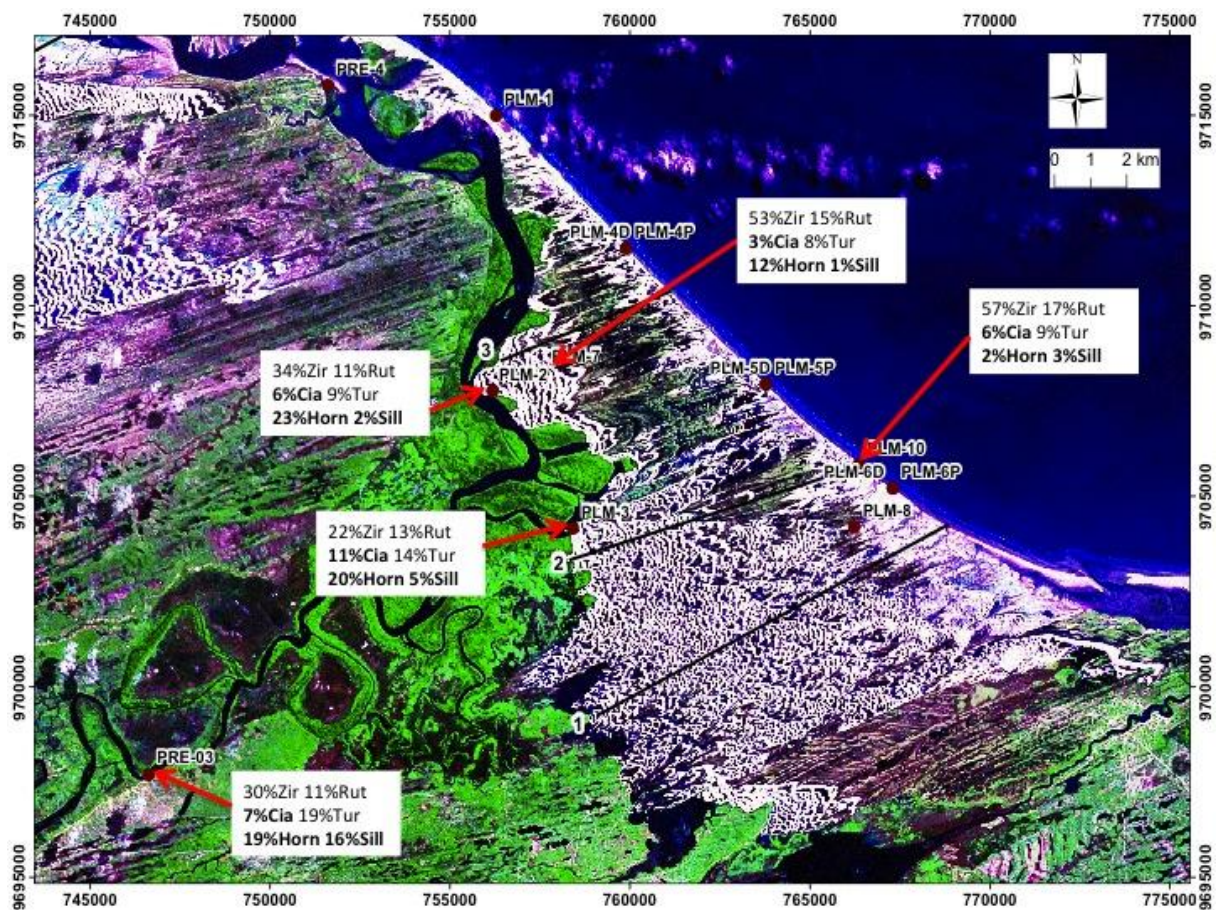


Figura 45. Variação espacial da assembleia quantitativa de minerais pesados no campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses e no rio Preguiças. Aumento relativo rumo ao interior de componentes de menor equivalente hidráulico (“pesados leves”), em detrimento dos de maior (“pesados pesados”), pode ser atribuído à seleção aerodinâmica.

6.4 Integração e discussão final dos diferentes tipos de resultados

Para efeito de discussão final de resultados, os valores de diâmetro médio, distância intercristas e frequência de contagem de zircão foram integrados em diagramas em função da distância da praia para cada um dos perfis que contasse com dados sedimentológicos (perfis 1, 3 e 4, nos Lençóis Maranhenses, e perfis 2 e 3, nos Pequenos Lençóis).

No perfil 1 (extremo sudeste) dos Lençóis Maranhenses (Figura 46A), não se detecta padrão regular de variação do diâmetro médio com a distância à praia, o que pode ser atribuído ao constante retrabalhamento das areias do campo de dunas pelo sistema de drenagens. A porcentagem de zircão (Figura 46B) aumenta para o interior do campo de dunas, possivelmente por efeito de enriquecimento residual deste mineral nas interdunas e drenagens intermitentes, onde, por sua elevada densidade, tenderia a maior permanência no sistema em detrimento de minerais mais leves e transportáveis.

No perfil 3, diâmetro médio em phi (Figura 47A) e porcentagem do zircão (Figura 47B) aumentam com a distância à praia. Já o perfil 4 (Figura 48) apresenta tendência inversa para diâmetro médio em phi (Figura 48A), mas análoga para zircão (Figura 48B).

Portanto, os dados de tamanho médio de grão, minerais pesados e parâmetros morfológicos nos Lençóis Maranhenses não apresentam entre si sempre o mesmo tipo de correlação ao longo do campo de dunas. Por outro lado, a tendência combinada de melhora de seleção granulométrica e de aumento relativo de minerais pesados menos densos rumo à costa pode ser interpretada como efeito da seleção durante o transporte sedimentar pelos rios que cortam este campo de dunas. Este intenso retrabalhamento dos Lençóis Maranhenses pelas drenagens ajuda a explicar a ausência de padrões bem definidos de variação de tamanho de grão, e também de parâmetros morfológicos, uma vez que favorece a configuração de área fonte com geometria plana.

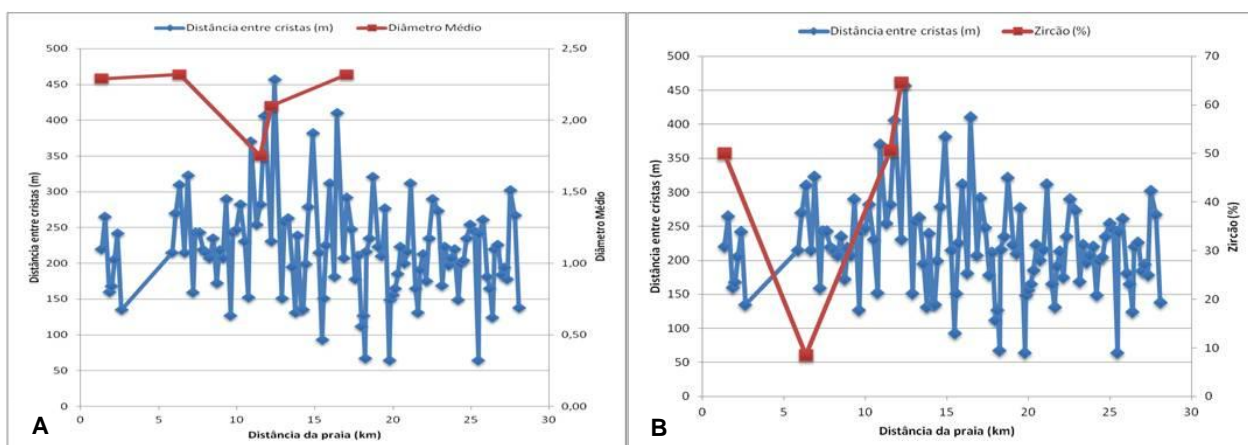


Figura 46. Gráficos representam o perfil 1 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.

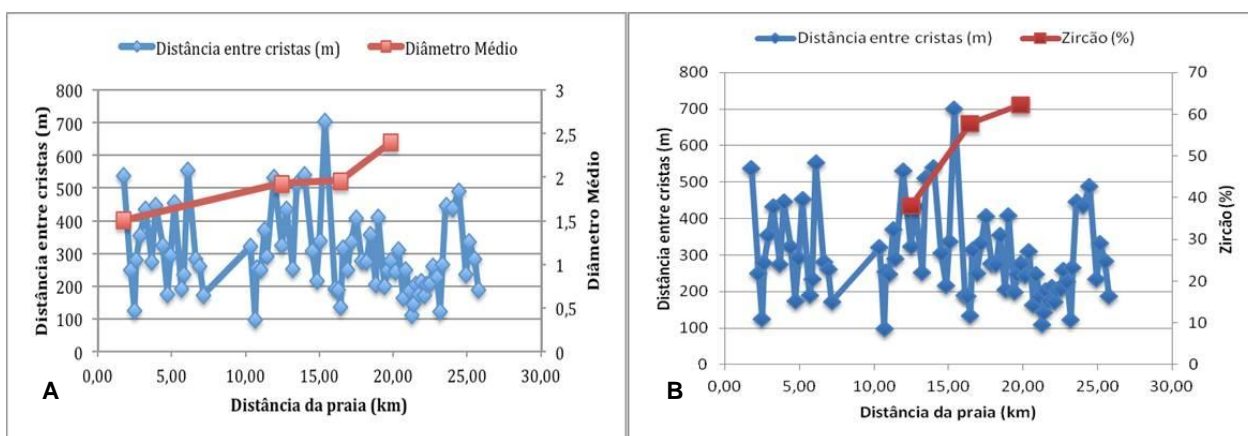


Figura 47. Gráficos representam o perfil 3 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.

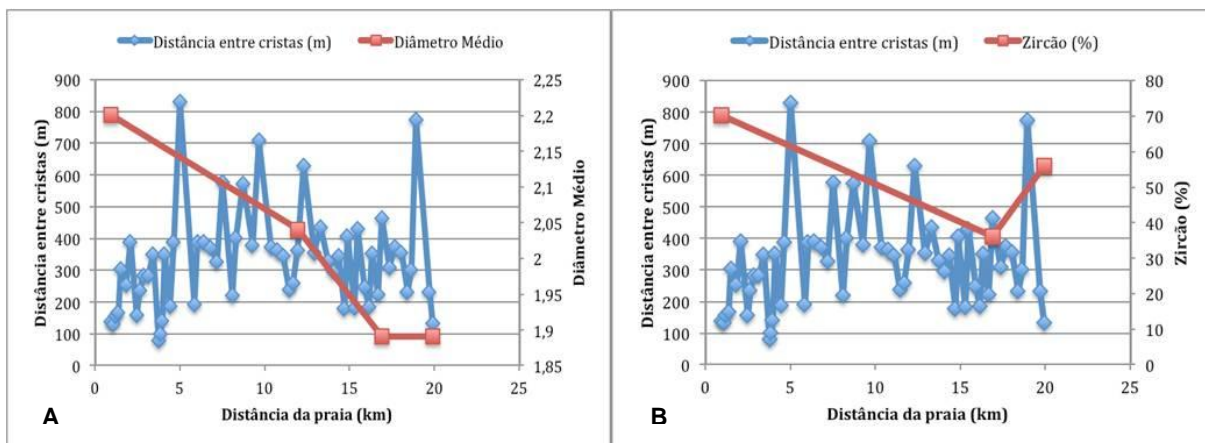


Figura 48. Gráficos representam o perfil 4 do campo de dunas dos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.

No que se refere aos Pequenos Lençóis Maranhenses, os resultados sedimentológicos obtidos nos perfis 2 e 3 (Figura 49 e Figura 50) mostram que diâmetro médio em phi e zircão diminuem com o aumento da distância à praia, padrão típico de seleção no rumo de transporte sedimentar, neste caso pelo vento. Os dados morfolanímétricos, porém, não apresentam padrões marcados de variação.

A ausência, nos dois campos de dunas estudados, das variações de parâmetros morfolanímétricos previstas no modelo de Ewing *et al.* (2006) deve-se principalmente à influência de fatores ligados à presença de água nas interdunas. Isto relaciona-se ao fato de aquele modelo ter sido concebido e interpretado com base em dunas de regiões áridas, como White Sands, no Novo México, Algodones, na Califórnia, Agneitir, na Mauritânia e Namib, na Namíbia. Em campos de dunas úmidos, o nível freático muito atuante pode e deve interferir nos padrões de variação espacial e, portanto, no significado geológico dos parâmetros morfolanímétricos.

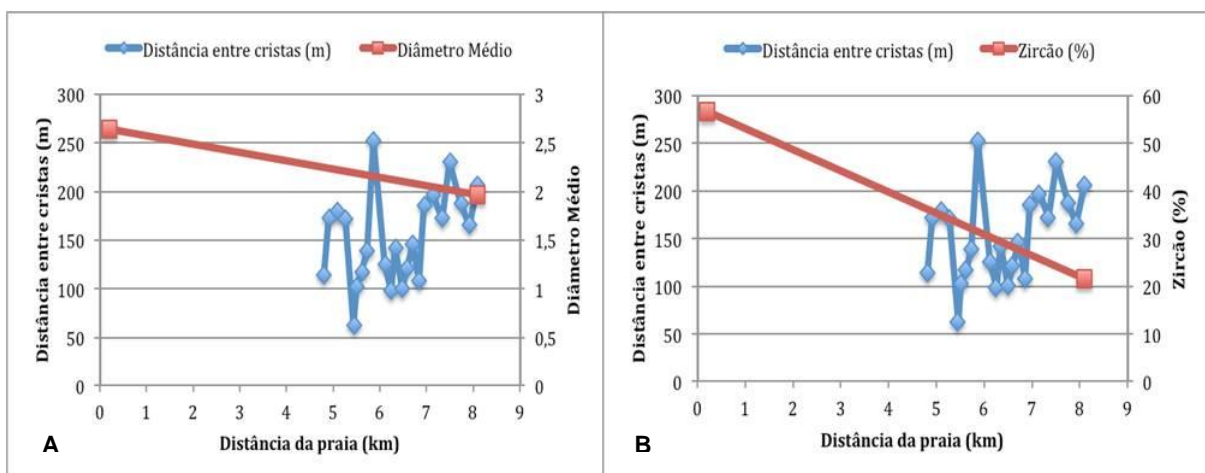


Figura 49. Gráficos representam o perfil 2 do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. A. Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. B. Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.

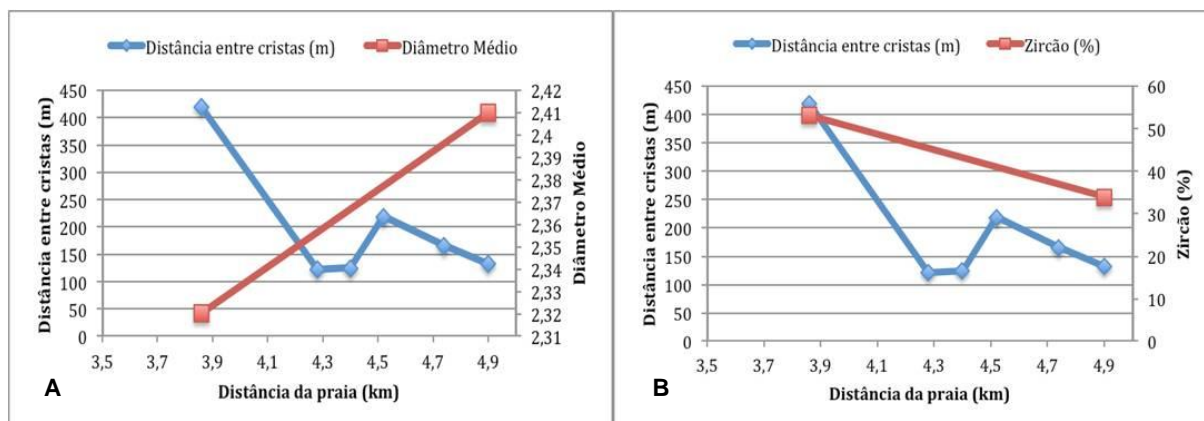


Figura 50. Gráficos representam o perfil 3 do campo de dunas dos Pequenos Lençóis Maranhenses. **A.** Relação entre distância da praia com distância intercristas e diâmetro médio. **B.** Relação entre distância entre cristas e concentração de zircão com a distância da praia.

7. CONCLUSÕES

O principal objetivo desse trabalho de formatura foi analisar a distribuição espacial das feições eólicas nos campos de dunas de Lençóis Maranhenses, Pequenos Lençóis, Tutoia e Ilha do Caju e as características sedimentológicas dos campos dos Lençóis e Pequenos Lençóis Maranhenses. Para tanto, realizaram-se pesquisa bibliográfica, sensoriamento remoto e caracterização sedimentológica, com ênfase em granulometria e minerais pesados. Com os resultados obtidos, relacionaram-se as feições eólicas e os atributos sedimentológicos com suas fontes imediatas de aporte sedimentar e com o grau de transporte.

Em relação ao sensoriamento remoto aplicado aos campos de dunas, os parâmetros morfoplanimétricos comprimento das cristas e distância entre cristas não variaram de modo estatisticamente consistente ao longo dos perfis, mas sim entre perfis. Esta variação entre perfis apresentou, entretanto, um padrão diferente para cada um dos campos de dunas estudados. Assim, Lençóis Maranhenses caracterizou-se por aumento de distância entre cristas e diminuição do comprimento de crista, de SE para NW, ao contrário de Pequenos Lençóis, em que se registrou diminuição de distância entre cristas e aumento de comprimento de crista nesse mesmo rumo. Já nos outros dois campos, Tutoia e Ilha do Caju, os padrões de variação de SE para NW foram, respectivamente, de aumento de comprimento de crista e distância intercristas e de diminuição de comprimento e distância entre cristas.

A ausência de padrão bem definido de variação morfoplanimétrica ao longo do rumo de migração eólica pode ser atribuída a pelo menos dois fatores, conjugados ou isolados. O primeiro é o fato de os campos de dunas estudados não terem atingido sua maturidade morfodinâmica, hipótese especialmente provável no caso dos Lençóis Maranhenses, onde aparentemente ainda não houve tempo suficiente para o desenvolvimento conspícuo de

planície de deflação. Já nos Pequenos Lençóis e Tutoia, a despeito da extensa planície deflacionar, o pequeno comprimento do sistema em relação à largura restringe a interação entre dunas eólicas na sua direção de migração, e assim, limita a maturidade do padrão evolutivo ou mascara os valores de espaçamento e comprimento de crista. O segundo fator está ligado à possibilidade de estes campos de dunas não possuírem geometria de área fonte linear, mas sim plana, o que, de acordo com Ewing & Kocurek (2010), determinaria parâmetros morfoplanimétricos constantes ao longo do campo. A fonte plana seria favorecida pelo retrabalhamento sedimentar intermitente pelos rios de estilo entrelaçado que cortam os campos de dunas ou mesmo pela inundação sazonal de planície de deflação e/ou depressões interdunas, uma característica esperada em sistemas eólicos úmidos.

O tamanho médio de grão dos campos de dunas investigados encontra-se entre areia média e areia fina. Apresenta, por algumas vezes, constância ao longo da extensão do sistema e, por outras, tendência de engrossamento para o interior. Em relação aos minerais pesados, ocorre diminuição de minerais relativamente menos densos para o interior dos Lençóis Maranhenses, efeito do intenso retrabalhamento e da seleção hidráulica através de rios que cortam esse campo de dunas rumo à costa. Nos Pequenos Lençóis Maranhenses, em contraposição, o interior do campo de dunas apresenta maiores porcentagens de minerais “pesados leves”, em detrimento dos “pesados pesados” zircão e rutilo, o que pode ser atribuído também ao transporte seletivo por densidade, só que agora pelo próprio vento. A redução de minerais pesados leves e, em especial, de hornblenda, de SE para NW nos Lençóis Maranhenses, permite aventar a hipótese de saída destes minerais do sistema, no transcorrer de seu progressivo retrabalhamento, seja por vento, rumo SW, seja pela deriva longitudinal, para NW, e pelos rios, para N e NE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo, R.J.; Lessa, G.C.; Souza, M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25: 486-506.
- Bagnold, R.A. 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen & Co. Ltd., London, 265 p.
- Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Martin, L.; Silva, I.R. 2005. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large scale accumulative and erosive zones: An overview. *Marine Geology*, 219:219-234.
- Caldas, L.H.O.; Stattegger, K.; Vital, H. 2006. Holocene sea-level history: evidence from coastal sediments of Rio Grande do norte coast, NE Brazil. *Marine Geology*, 228:39-53.
- Derickson, D., Kocurek, G., Ewing, R.C., Bristow, C., 2008. Origin of a complex and spatially diverse dune-field pattern, Algodones, southeastern California. *Geomorphology* 99, 186–204.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). 1876. Tábuas das marés. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm>. Acesso em: 16/03/2013.
- Ewing, R.C., Kocurek, G., Lake, L.W., 2006. Pattern analysis of dune-field parameters. *Earth Surf. Proc. Land*. 31, 1176–1191.
- Ewing, R.C., Kocurek, G., 2010. Aelion dune-field pattern boundary conditions. *Geomorphology* 114, 175-187.
- Fryberger, S.G. 1979. Dune forms and wind regime. In: McKEE, E.D. ed. *A Study of Global Sand Seas*, p.83-154. Washington, U.S. Geological Survey (Professional Papers, 1052).
- Galehouse, J.S. 1971. Point-counting. In: Carver, R.E. ed. *Procedures in Sedimentary Petrology*. New York, Wiley- Interscience. p.385-407.
- Gardner, D.E. 1955. Beach-sand heavy-mineral deposits of Eastern Austrália. *BMR Bulletin*, 28:103 p.
- Giannini, P.C.F. 1993. *Sistemas Depositionais no Quaternário Costeiro entre Jaquaruna e Imbituba, SC*. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. Tese de Doutorado (iné.). 2 v., 2 mapas, 439 p.
- Giannini, P.C.F. 2007. *Sistemas Depositionais Eólicos no Quaternário Costeiro do Brasil*. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. Tese de Livre Docência. 200p.
- Giannini, P.C.F.; Assine, M.L.; Barbosa, L.; Barreto, A.M.F.; Carvalho, A.M.; Cladino-Sales, V.; Maia, L.P.; Martinho, C.T.; Peulvast, J.P.; Sawakuchi, A.O.; Tomazelli, L.J. 2005. Dunas eólicas costeiras e interiores. In: Souza, C.R.G.; Suguio, K.; Oliveira, P.E.; Oliveira, A.M. ed. *Quaternário do Brasil*. Abequa, ANP, FAPESP, IG, UnG. Ribeirão Preto, SP, Holos Editora, cap.11, p.235-257.
- Giannini, P.C.F.; Sawakuchi, A.O.; Martinho, C.T.; Guedes, C.C.F.; Nascimento, Jr., D.R.; Tanaka, A.P.B.; Mendes, V.R.; Zular, A.; Andrade, H.A.A.; Fornari, M. 2011. Classificação e dinâmica de feições eólicas costeiras: um modelo sistêmico baseado em exemplos brasileiros. In: Congresso da ABEQUA, 13, Búzios, RJ. Resumo expandido, 5p.
- Goldsmith, V. 1978. Coastal dunes. In: Davies Jr., R.A. *Coastal Sedimentary Environments*. Amsterdam, Springer Verlag, p.171-235.
- 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*. 260 f. Tese de Doutorado - UFRGS – Instituto de Geociências, Porto Alegre.

- Gonçalves, R.A.; Leheuger, L.G.; Castro, J.W.A. 2002. Evolução das dunas costeiras e seu registro geológico: o modelo Lençóis Maranhenses, Maranhão, Brasil. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 4, Anais... São Luís, UGB, p.45.
- Gonçalves, R.A., Leheuger, L.G.O., Castro, J.W.A., Pedroto, A.E.S. 2003. Classificação das feições eólicas dos lençóis maranhenses – Maranhão – Brasil. *Mercator*, 02(03): 99-112.
- Howell, J.W. 1960. Glossary of Geology and Related Sciences. Washington, Amer. Geol. Inst. 325p.
- Hesp, P.A. 1983. Morphodynamics of incipient foredunes in New South Wales, Austrália. In: Brookfield, M.E. & Ahlbrandt, T.S. eds. *Eolian Sediments and Processes*. Amsterdam, Elsevier. p. 325-342 (Developments in Sedimentology, 38).
- Hesp, P.A. 1988. Morphofology, dynamics and internal stratification of some established foredunes in Southeast Austrália. *Sediment. Geol.*, 55(1/2): 17-41.
- Hesp, P.A., Maia, L.M., Claudino-Sales, V. 2009. The Holocene barriers of Maranhão, Piauí and Ceará States, Northeastern Brazil. In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P. (eds.). *Geology of the Brazilian Coastal Barriers. Lecture Notes in Earth Sciences*. Berlin: Springer, p. 325-345.
- Hesp, P.A. 2000. Coastal sand dunes. Form and Function. CDNV Technical Bulletin No. 4. Massey University, 28 pp.
- Hilbert, N.N.; Giannini, P.C.F.; Guedes, C.C.F. 2012. Parâmetros morfoplanimétricos dos campos de dunas eólicos dos Lençóis Maranhenses e Pequenos Lençóis Maranhenses, Maranhão. In: 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos – SP.
- Kocurek, G.; Havholm, K.G. 1993. Eolian Sequence Stratigraphy – A Conceptual Framework. In: *Siliciclastic Sequence Stratigraphy*. AAPG Memoir 58, cap.16. p.393-409.
- Kocurek, G. & Nielson, J. 1986. Conditions favourable for the formation of warm climate aeolian sand sheets. *Sedimentology*, 33(6): 795-816.
- Martinho, C.T.; Giannini, P.C.F.; Sawakuchi, A.O. 2003. Fácies morfológicas e fácies deposicionais de campos de dunas transgressivos ativos da região de Jaguaruna-Imbituba, SC. In: Congr. da ABEQUA, 9, Recife. Anais...cd.
- Martinho, C.T., Giannini, P.C.F., Sawakuchi, A.O.; Hesp, P.A. 2006. Morphological and depositional facies of transgressive dunefields in the Imbituba- Jaguaruna region, Santa Catarina State, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, S139, no prelo.
- McLaren, P.; Bowles, D. The effects of sediment transport on grainsize distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, v. 55, n. 4, p.457-470, 1985.
- Pianca, C.; Luigi, F.P.; Siegle, E. 2010. Brazilian onshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1): 53-70.
- Santos, J.H.S., 2008. Lençóis Maranhenses atuais e pretéritos: um tratamento espacial. Rio de Janeiro, UFRJ/PPGG. Tese de Doutorado. 246p.
- Santos, J.H.S., Castro, J.W.A., Gonçalves, R.A., Santos, N.F.B. 2005. Modelo evolutivo do campo de dunas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses-MA/Brasil. In: Congr. da ABEQUA, X, Guarapari-ES. Anais...cd.
- Sarre, R.D. 1988. Evaluation of aeolian sand transport equations using intertidal zone measurements, Sauton Sands, England. *Sedimentology*, 35: 671-679.
- Sawakuchi, A.O. 2006. Morfometria e simulação numérica de campos de dunas costeiras estudo baseado em exemplos brasileiros. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. Tese de Doutorado. 316p.

- Short, A.D.; Hesp, P.A. 1982. Wave, beach and dune interactions in South-eastern Austrália. *Marine Geology*, 48(4): 259-284.
- Short, A.D.; Hesp, P.A. 1984. Beach and dune morphodynamics of the southeast coast of South Australia. Tech. Rept. 84/1. Coastal Studies Unit. Dept. Geography, Univ. Sydney, 142p.
- Short, A.D. 1988. Holocene coastal dune formation in Southern Austrália: a case study. *Sediment. Geol.*, 55(1/2):121-142.
- Tomazelli, L.J. 1990. Contribuição ao Estudo dos Sistemas Depositionais Holocênicos do Nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul, com Ênfase no Sistema Eólico. Porto Alegre, Universidade Federal Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado (inéd). 270p.
- White, B.R. 1979. Soil transport by winds on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 84: 4643-51.
- Wright, L.D., Chappel, J, Thom, B., Bradsha, W.M., Cowell, P. 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: South Austrália. *Marine geology*, 32(1): 105-140.