



DIVERSIDADE EÓLICA EM ÁREAS PROTEGIDAS: EXEMPLO DA PLANÍCIE COSTEIRA DA MASSAMBABA, ESTADO DO RIO DE JANEIRO.

Gabriela da Cruz¹
Ivandro Patrick de Oliveira Coutinho²
Guilherme Borges Fernandez³

RESUMO

A geodiversidade compreende a variedade de elementos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, sendo essenciais para a conservação da biodiversidade, a manutenção dos processos ecológicos e o equilíbrio da diversidade natural do planeta. Estudos relacionados a geodiversidade tem se tornado cada vez mais importantes, também quando aplicados a geoconservação, uma vez que o conhecimento científico é uma das ferramentas para a manutenção de áreas protegidas. Em 2011, foi criada no litoral do Estado do Rio de Janeiro uma unidade de conservação de uso restrito, caracterizada pela formação do Parque Estadual da Costa do Sol (PECS), composto por diferentes núcleos geograficamente descontínuos. Entre os diferentes núcleos, o Núcleo Massambaba talvez seja o que mais sofre pressão antrópica, em função da proximidade de localidades com forte ação de supressão das características naturais. Mais ainda, este Núcleo talvez seja um dos menos documentados sobre sua geodiversidade. A geomorfologia da Massambaba é marcada por barreiras costeiras posicionadas paralelamente a costa, em resposta às flutuações mais recentes do nível relativo do mar no Quaternário. Com o objetivo de caracterizar a geomorfologia eólica de parte da Massambaba, foi feito um inventário de formas eólicas no trecho pleistocênico da Massambaba. Para a identificação morfológica das dunas foram utilizadas ortofotos e modelos digitais de superfície (MDS), gerados a partir de imagens capturadas por Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) e processadas com técnicas de *Structure from Motion* (SfM). O mapeamento inicial das imagens revelou a ocorrência de dunas parabólicas simples e compostas. As dunas simples foram classificadas com base na mensuração de parâmetros geométricos, utilizando-se a razão de aspecto (Comprimento/Largura) como critério de distinção morfológica, enquanto as dunas compostas foram analisadas por interpretação visual, considerando a disposição e a sobreposição das feições na planície de deflação. A tipologia predominante no trecho analisado foram dunas tipo *elongated* ou *hairpin*, com lóbulos deposicionais projetados para SW e braços longos paralelos, em função da predominância de ventos de direção NE. Outras tipologias, como *lobate*, *nested* e *digitate*, indicaram que tais padrões estariam associados a flutuações na direção dos ventos predominantes, assim como retrabalhamento de sedimentos na planície de deflação, ou mesmo controle morfológico exercido pela vegetação. A análise morfométrica indicou que dunas *hairpin* apresentaram razão C/L superiores a 3,75, enquanto dunas *lobate* revelaram proporções inferiores a 3, permitindo a distinção geométrica precisa entre as feições. Os perfis topográficos longitudinais e transversais, gerados a partir dos MDS, reforçaram a interpretação morfológica, evidenciando diferenças de altura e organização interna dos lóbulos. A partir dos dados obtidos pelo inventário, mostra que a Massambaba apresenta um elaborado mosaico de formas eólicas, com uma distribuição espacial específica. A integração entre dados aerofotogramétricos de alta resolução, processamento SfM e análise geomorfológica demonstrou ser uma metodologia eficiente para o mapeamento de formas eólicas em ambientes costeiros sensíveis. Além de documentar a diversidade geomorfológica da área, o estudo reforça a importância da geoconservação no contexto do litoral fluminense, evidenciando como que o mapeamento de dunas pode contribuir para patrimônio natural do Rio de Janeiro.

¹ Mestre pelo curso de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, gabriela_cruz@id.uff.br;

² Mestre pelo curso de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, ipatrick@id.uff.br;

³ Professor orientador: Dr, Universidade Federal Fluminense - UFF, gfernandez.lagefuff@gmail.com;



Palavras-chave: Geodiversidade; Dunas Parabólicas; Geoconservação; Aeronave Remotamente Pilotada (ARP); Structure from Motion (SfM).

INTRODUÇÃO

O conceito de geodiversidade, consolidado por autores como Gray (2013) e Kozłowski (2004), refere-se à variedade de elementos e processos abióticos da natureza — rochas, minerais, solos, fósseis e formas de relevo — e constitui a base física sobre a qual a biodiversidade se desenvolve. Reconhecendo seu valor intrínseco, científico e cultural, a geoconservação emerge como a prática dedicada à proteção e ao manejo sustentável deste patrimônio, não apenas de sítios estáticos, mas também dos processos dinâmicos que moldam a paisagem (Brilha et al., 2018; Sharples, 2002). No âmbito da geoconservação, que visa proteger e gerenciar sítios de interesse geológico e geomorfológico, o estudo de paisagens eólicas costeiras ganha especial relevância (Brilha, 2005).

A geomorfologia eólica, segundo Pye e Tsoar (2009), estuda as formas de relevo geradas pela ação do vento, como as dunas, cuja morfologia é condicionada pela disponibilidade de sedimento, regime de ventos e presença de obstáculos. Dentre as diversas tipologias, as dunas parabólicas são particularmente relevantes em ambientes costeiros, pois sua gênese está associada à vegetação, que ancora os braços da duna enquanto seu lobo deposicional migra, criando formas em "U" ou "V". A classificação dessas feições, proposta por McKee (1979) e detalhada por Pye (1993), utiliza critérios morfológicos e morfométricos, como a razão de aspecto (C/L), para distinguir subtipos como *lobate* e *elongated (hairpin)*.

O avanço de geotecnologias, como as Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) e a técnica *Structure from Motion* (SfM), tem revolucionado os estudos geomorfológicos ao permitir a geração de modelos tridimensionais de alta resolução a baixo custo, viabilizando uma análise detalhada de feições complexas (Westoby et al., 2012). A planície costeira da Massambaba (RJ), inserida no Parque Estadual da Costa do Sol (PECS), apresenta um campo de dunas com feições de grande diversidade morfológica, formadas por retrabalhamento eólico sobre depósitos pleistocênicos, mas que permanecem pouco documentadas sob uma abordagem sistemática. Apesar desse potencial tecnológico e da importância da área, a planície costeira da Massambaba, inserida no Parque Estadual da Costa do Sol (PECS), apresentava uma lacuna de conhecimento, sendo suas feições eólicas descritas apenas de forma genérica como "retrabalhamento eólico".



A justificativa deste estudo reside, portanto, na necessidade de documentar e valorizar este patrimônio geomorfológico em uma Unidade de Conservação, de forma a gerar conhecimento científico que subsidie ações de manejo e proteção do patrimônio natural. Diante do exposto, o objetivo principal deste trabalho é identificar e classificar detalhadamente a morfologia das dunas parabólicas na porção central da planície costeira da Massambaba. Os objetivos específicos são: (i) realizar análise morfométrica das dunas simples; (ii) classificar as dunas simples e compostas conforme as tipologias da literatura; e (iii) produzir um quadro morfológico classificando a tipologia das dunas.

A síntese metodológica envolveu o mapeamento das feições a partir de ortofotos e processamento de imagens de ARP com SfM para gerar ortofotomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (MDS), a partir dos quais as dunas foram vetorizadas e analisadas morfometricamente. Os resultados revelaram a ocorrência de um campo de dunas complexo, com a predominância de dunas parabólicas simples do tipo *elongated (hairpin)* e *lobate*, e compostas dos tipos *nested* e *digitate*. Conclusivamente, a pesquisa não apenas revela a notável geodiversidade morfológica da área, mas também demonstra a aplicação estratégica das geotecnologias para a geoconservação. Os resultados fornecem subsídios que qualificam o conhecimento sobre o PECS e reforça a proposta do Geoparque Costões e Lagunas do Rio de Janeiro, sendo fundamentais para aprimorar os instrumentos de gestão e as ações de valorização deste patrimônio.

METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)

Os caminhos metodológicos desta pesquisa foram estruturados em quatro etapas principais: planejamento, coleta de dados, processamento e análise, visando a caracterização morfológica das feições eólicas na planície costeira da Massambaba. O instrumento central para a coleta de dados de detalhe foi uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) do modelo Phantom 4 Pro Obsidian. Foram realizados 4 voos em junho de 2022, cobrindo duas áreas de interesse (Campanha 1 e Campanha 2), com planos de voo elaborados no aplicativo DroneDeploy. Os voos ocorreram a uma altura média de 95 metros, com sobreposição de imagem de 80% (frontal e lateral), o que resultou em produtos com resolução (GSD) variando de 1,4 a 2,5 cm/pixel. Para garantir a acurácia dos produtos, foi realizado um levantamento de pontos de apoio em campo, divididos em pontos de controle (para ajuste do modelo) e checagem (para verificação da precisão). Estes pontos foram medidos com uma estação total



Leica TS06 e um prisma, tendo suas coordenadas planimétricas obtidas com um GPS Garmin GPSMap 64S e a referência altimétrica ajustada ao nível da Lagoa de Araruama.

O processamento das imagens e dos pontos de apoio foi executado no software Agisoft Metashape Professional, utilizando a técnica de fotogrametria *Structure from Motion* (SfM). Este processo gerou os produtos finais para análise: ortofotomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (MDS) de alta resolução para as duas campanhas. Todos os dados e produtos cartográficos foram georreferenciados ao sistema SIRGAS 2000, projeção UTM Zona 23S.

Para a classificação das dunas, a abordagem metodológica combinou os modelos morfológicos de Pye e Tsoar (2009) com a aplicação dos critérios de razão de aspecto (C/L) de Pye (1993), que relaciona o comprimento e a largura das feições. Essa abordagem permite uma distinção sistemática entre diferentes tipologias de dunas parabólicas simples, sendo utilizadas as seguintes categorias: *lunate* ($C/L < 0,4$), *hemicyclic* (C/L entre 0,4 e 1), *lobate* (C/L entre 1 e 3) e *elongated* ou *hairpin* ($C/L > 3$). As dunas parabólicas simples foram classificadas pela razão de aspecto (C/L), conforme metodologia de Yan & Baas (2017), onde 'C' é o comprimento e 'L' a largura média da duna.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificadas na área de estudo dunas parabólicas com morfologia simples e composta. As dunas simples são representadas por D1-a, D1-b, D1-c, D1-e, D2-a e D2-c caracterizadas por apresentarem uma única crista principal com braços bem definidos e morfologia individualizada, o que sugere um processo de formação isolado, sem sobreposição de outras feições. Por outro lado, as dunas compostas D1-d e D2-b apresentam sobreposição ou associação entre múltiplas formas parabólicas, resultando em morfologias mais complexas com múltiplos eixos ou cristas (Figura 1).

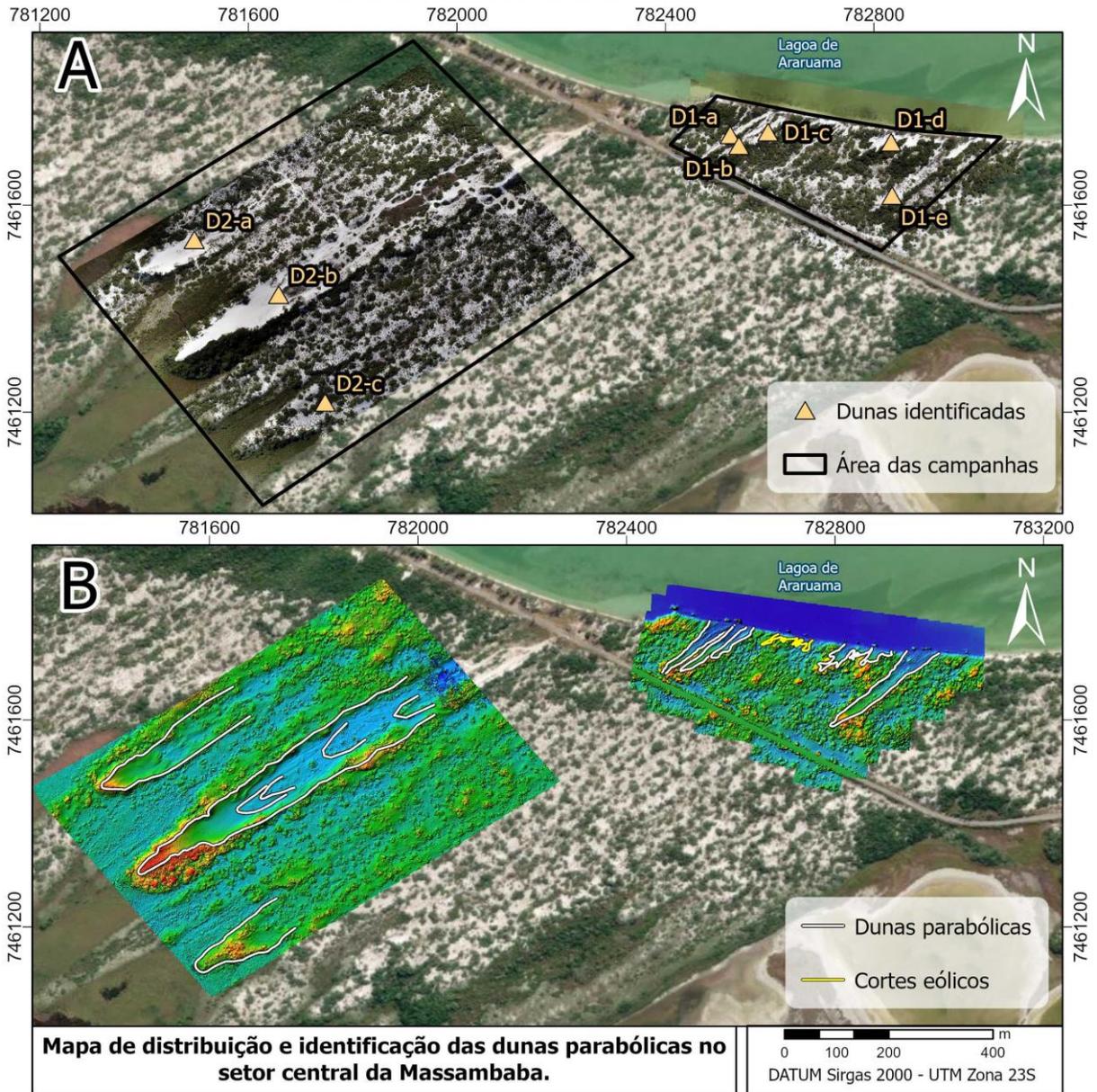


Figura 1. Mapeamento das dunas identificadas com os prefixos e caracterização preliminar das dunas parabólicas na área de estudo. (A) Localização das dunas parabólicas identificadas a partir da interpretação visual das ortofotos, com destaque para os polígonos correspondentes às campanhas de levantamento com ARP. (B) Representação dos modelos digitais de superfície (MDS) gerados por fotogrametria, com a delimitação das dunas parabólicas (linhas brancas) e cortes eólicos associados (linhas amarelas). As feições foram codificadas para posterior análise.

As dunas simples do tipo *elongated/hairpin* foram as mais expressivas e recorrentes, especialmente na Campanha 1. Estas feições, caracterizadas por braços longos e paralelos e uma elevada razão de aspecto ($C/L > 3$), indicam a atuação de ventos unidirecionais fortes e persistentes. A análise morfométrica (Tabela 1) revelou valores de C/L que chegaram a 9,73, com comprimentos superiores a 200 metros e alturas de até 8 metros. A discussão sobre sua gênese, corroborando com Fernandez *et al.* (2017) em áreas próximas, aponta para a formação

a partir de cortes eólicos (*blowouts*) na margem vegetada da Lagoa de Araruama. A tendência erosiva nessa margem, já apontada por Muehe e Correa (1989), expõe sedimentos que são então remobilizados pelos ventos de nordeste, dando início à formação das dunas.

Tabela 1 - Campanha 1 – Razão de aspecto e classificação de feições mapeadas.

Feição	Comprimento* (m)	Largura* (m)	Razão de Aspecto (C/L)	Classificação	Maior altimetria	Menor altimetria	Altura
D1-a	136,99	36,5	3,75	<i>Elongated - Hairpin</i>	6,34	0	6,34
D1-b	144,20	14,82	9,73	<i>Elongated - Hairpin</i>	7,19	0	7,19
D1-c	92,71	12,18	7,61	<i>Elongated - Hairpin</i>	7,81	0	7,81
D1-e	222,49	33,79	6,58	<i>Elongated - Hairpin</i>	8,28	0	8,28

*média

A duna simples do tipo lobate (D2-c), com razão C/L de 2,93 (Tabela 2), apresentou uma morfologia mais compacta, com um lobo frontal largo e braços mais curtos. A maior cobertura vegetal sobre esta feição sugere um estágio mais avançado de estabilização em comparação com as formas *elongated*.

Tabela 2 - Campanha 2 – Razão de aspecto e classificação de feições mapeadas.

Feição	Comprimento* (m)	Largura* (m)	Razão de Aspecto (C/L)	Classificação	Maior altimetria	Menor altimetria	Altura
D2-a	315,57	62,80	5,02	<i>Elongated - Hairpin</i>	12,80	4,00	8,80
D2-c	199,19	68,04	2,93	<i>Lobate</i>	11,17	2,92	8,25

*média

As dunas compostas revelaram processos morfodinâmicos mais complexos. A duna *digitate* (D1-d) foi identificada como uma feição com múltiplos lóbulos deposicionais que se projetam a partir de uma planície de deflação comum. Este padrão resulta da deflexão dos fluxos de vento no interior de um corte eólico, condicionada por irregularidades topográficas e pela vegetação, que canaliza o transporte de sedimento em múltiplas direções, como descrito por Barchyn e Hugenholtz (2013).

A feição mais notável da Campanha 2 foi uma grande duna *nested*, com mais de 500 metros de extensão. Sua característica principal é abrigar, em sua ampla planície de deflação, diversas dunas parabólicas menores. Este arranjo evidencia uma história de múltiplos



episódios de reativação e deposição, formando uma estrutura complexa e multigeracional que reflete a sensibilidade e a dinâmica contínua do sistema eólico local.

Além disso, foi possível observar uma tendência de correlação entre o comprimento (C) das dunas parabólicas e sua altura máxima (A). As feições classificadas como do tipo elongated ($C/L > 3$), apresentaram maiores comprimentos longitudinais e também alturas superiores, chegando a ultrapassar 11 metros em alguns casos. Em contraste, as dunas do tipo *lobate*, com menor razão de aspecto, apresentaram alturas mais modestas, geralmente inferiores a 8 metros.

Essa relação indica que, à medida que as dunas se tornam mais desenvolvidas longitudinalmente, há uma maior acumulação de sedimentos ao longo do eixo principal, resultando também em paredes laterais mais altas e faces de avalanche mais acentuadas. Isso corrobora o que foi descrito por autores como Pye e Tsoar (2009) e Vimpere (2023), que apontam que o grau de desenvolvimento longitudinal das dunas parabólicas está associado à sua maturidade e à capacidade dos ventos de transportar sedimentos por distâncias maiores, favorecendo a verticalização da estrutura da duna. Tal padrão também pode indicar diferentes estágios de evolução morfológica dentro da própria planície costeira da Massambaba, com feições mais desenvolvidas sugerindo maior tempo de atuação eólica e possível estabilidade na direção e intensidade dos ventos.

Os resultados encontrados indicam que a coexistência dessas quatro tipologias (Figura 2) em uma área restrita é um forte indicador da elevada geodiversidade da planície da Massambaba. A dinâmica local é modulada pela interação entre processos naturais (regime de ventos, erosão lagunar) e antrópicos, como a presença de trilhas de veículos que fragmentam a vegetação estabilizadora e podem intensificar a mobilidade dos sedimentos, representando um risco à conservação, como alertado por Meireles (2011) para outras áreas dunares no Brasil.

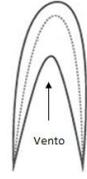
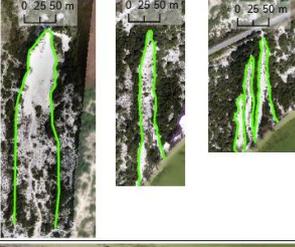
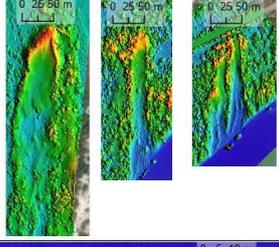
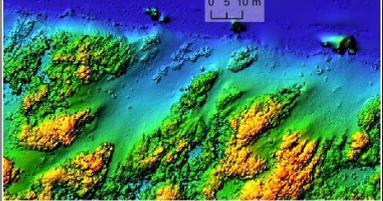
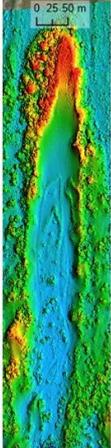
Tipo	Classificação	Diagrama	Descrição	Ortofoto	MDS
S i m p l e s	<i>Lobate</i> $1 < C/L < 3$		Duna com braços mais curtos que apresenta proporção entre comprimento e largura mais equilibrada, com morfologia mais compacta.		
	<i>Elongated - Hairpin</i> $C/L > 3$		Duna de formato alongada com braços paralelos que envolvem uma planície de deflação bem desenvolvida. O comprimento é significativamente maior que a largura, indicando forte influência de ventos unidirecionais.		
C o m p o s t a s	<i>Digitate</i>		Feição composta por múltiplos lóbulos deposicionais que se projetam a partir de uma planície de deflação comum. Indica atividade eólica concentrada em diferentes direções.		
	<i>Nested</i>		Duna parabólica composta, onde formas menores de um mesmo tipo estão sobrepostas ou inseridas dentro de uma duna principal. Reflete múltiplos episódios de deposição e reativação, formando uma estrutura complexa e multigeracional.		

Figura 2 – Quadro morfológico de dunas. Síntese morfológica das dunas parabólicas da área de estudo. O quadro ilustra cada tipologia (*Lobate*, *Elongated-Hairpin*, *Digitate* e *Nested*) com seu diagrama esquemático (Pye e Tsoar, 2009), descrição, e exemplos visuais em ortofoto e Modelo Digital de Superfície (MDS). Fonte: Elaborado pela autora.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentes padrões morfológicos foram identificados na porção central da Massambaba em função do nível de detalhamento oferecido pelos mosaicos aerofotogramétricos digitais, processados por algoritmos de interpolação a partir das técnicas de *Structure from Motion* (SfM). Esse avanço evidenciou como o barateamento dos custos de aquisição de aeronaves e o aprimoramento das rotinas computacionais permitiram progressos significativos na interpretação de dados morfológicos relacionados à ação eólica.

Assim, formas que antes eram genericamente associadas à atuação do vento sobre a barreira pleistocênica revelaram, na verdade, um padrão mais complexo de diferentes tipos de



dunas parabólicas. Há ainda perspectivas relevantes para investigações futuras sobre a arquitetura deposicional da área, considerando que, se o substrato conservar registros marinhos, a superfície atual poderá apresentar padrões geomorfológicos ainda mais variados.

As dunas e praias da Planície Costeira da Massambaba constituem ambientes sensíveis e de elevado valor paisagístico. Esses sistemas atuam como barreiras naturais contra a erosão costeira e oferecem habitat para espécies de fauna e flora adaptadas a esse contexto específico. Nesse sentido, a inclusão dessa planície no Parque Estadual da Costa do Sol (PECS) é fundamental para garantir sua conservação.

Uma vez que este trabalho foi desenvolvido na parte central da Massambaba, que faz parte do Parque Estadual da Costa do Sol, é mais um estudo que auxilia cientificamente nos esforços para a consolidação do Geoparque Costões e Lagunas do Estado do Rio de Janeiro, em função do reconhecimento que este trecho apresenta particularidades sobre o patrimônio geomorfológico.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de fomento, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Prof. Dr. Guilherme Borges Fernandez pela orientação. Ao Laboratório de Geografia Física (LAGEF-UFF) pelo suporte.

REFERÊNCIAS

BARCHYN, T. E.; HUGENHOLTZ, C. H. Reactivation of supply-limited dune fields from blowouts: a conceptual framework for state characterization. **Geomorphology**, v. 201, p. 172-182, 2013.

BRILHA, J. **Patrimônio Geológico e Geoconservação**. A conservação da natureza na sua vertente geológica. Braga: Palimage Editores, 2005.

BRILHA, J.; GRAY, M.; PEREIRA, D. I.; PEREIRA, P. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. **Environmental Science and Policy**, v. 86, p. 19–28, 2018.

FERNANDEZ, G. B.; PEREIRA, T. G.; ROCHA, T. B.; MALUF, V.; MOULTON, M.; OLIVEIRA FILHO, S. R. de. Classificação morfológica das dunas costeiras entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, litoral do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 3, 2017.



GRAY, M. **Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature**. 2^a ed. John Wiley & Sons, 2013.

KOZŁOWSKI, S. **Geodiversity**. The concept and scope of geodiversity. *Przegląd Geologiczny*, v. 52, n. 8 II, p. 833-837, 2004.

McKEE, E. D. (ed.). **A study of global sand seas**. Professional Paper 1052. Reston, VA: US Geological Survey, 1979.

MEIRELES, Antônio Jeovah de Andrade. Geodinâmica dos campos de dunas móveis de Jericoacoara/CE-BR. **Mercator: Revista de Geografia da UFC**, v. 10, n. 22, p. 169-190, maio/ago. 2011.

MUEHE, D.; CORRÊA, C. H. T. The coastline between Rio de Janeiro and Cabo Frio. In: NEVES, Claudio (ed.). **Coastlines of Brazil**. New York: American Society of Civil Engineers, 1989. p. 110-123.

PYE, K. Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia. In: PYE, Kenneth; LANCASTER, Nicholas (ed.). **Aeolian sediments**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 1993. p. 23-44.

PYE, K., & TSOAR, H. **Aeolian Sand and Sand Dunes**. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

SHARPLES, C. **Concepts and Principles of Geoconservation**. Tasmanian Parks & Wildlife Service, 2002.

VIMPERE, L. Parabolic dune distribution, morphology, and activity during the last 20,000 years: a global overview. **Earth Surface Processes and Landforms**, p. 1–30, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.5648>.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. Structure-from-motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

YAN, N.; BAAS, A. Environmental controls, morphodynamic processes, and ecogeomorphic interactions of barchan to parabolic dune transformations. **Geomorphology**, v. 278, p. 209-237, 2017.

