



Do Holoceno ao presente: a evolução de uma barreira retrogradante sob diferentes escalas de análise

Lígia Padilha Novak¹

Thaís Baptista da Rocha²

Guilherme Borges Fernandez³

Marcio Elysio Tavares de Mello Filho⁴

Beatriz Abreu Machado⁵

RESUMO

A diversidade morfológica das barreiras costeiras reflete a interação entre os fatores geológicos, oceanográficos e morfodinâmicos que atuam em distintas escalas. Por isso, a articulação entre as perspectivas geológicas e históricas é fundamental para compreender o comportamento desses sistemas, especialmente diante das mudanças climáticas e das projeções de aumento do nível relativo do mar. Este estudo investigou o comportamento da barreira retrogradante localizada no Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul (CDRPS), considerando a evolução geológica, dinâmica da linha de costa (LC) entre 1984 e 2020., complementada por perfis topográficos (2010 a 2019). Para curto prazo (2018 – 2021) foram utilizados dados do modelo *Wave Watch II*, aviso de mau tempo (Marinha do Brasil), cartas sinóticas que permitiram identificar 52 tempestades e mapear leques de transposição por imagens de satélite PlanetScope (3m). A análise da arquitetura deposicional revelou um empilhamento em direção ao continente desde aproximadamente 6700 anos A.P., durante o Holoceno médio, indicando dominância de fluxos sedimentares para o reverso da barreira. Mesmo após a estabilização e posterior queda relativa do nível do mar nos últimos 5,5 ka, o sistema manteve características retrogradantes, atribuídas principalmente ao déficit sedimentar e à frequência de processos de transposição de ondas. Os leques de transposição foram mais frequentes em setores de baixa altitude (<5 m), e em locais com maior recuo da LC. A integração dos dados evidencia que a retrogradação é impulsionada por mecanismos que operam em diferentes escalas, dos milênios às tempestades sazonais. Em um cenário de mudanças climáticas, a continuidade do processo de migração em direção ao continente pode ser um problema em áreas urbanizadas. Por outro lado, a proteção legal da paisagem por meio do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (PARNA de Jurubatiba) oferece uma oportunidade única para o monitoramento da resiliência das barreiras arenosas frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Barreiras arenosas; linha de costa; eventos de tempestade, leques de transposição.

¹ Doutora em Geografia pela Universidade Federal Fluminense, ligianovak@ufpr.br;

² Professora orientadora: Doutora em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, thaisbaptista@id.uff.br;

³ Professor coorientador: Doutor em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, guilhermefernandez@id.uff.br;

⁴ Doutorando em Geografia pelo Curso de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal Fluminense – UFF, marciomello@id.uff.br;

⁵ Doutoranda em Geografia pelo curso de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal Fluminense – UFF, abreu_beatriz@id.uff.br.

INTRODUÇÃO

As barreiras arenosas costeiras representam feições deposicionais proeminentes ao longo de margens passivas, desenvolvidas principalmente pela ação das ondas e caracterizadas pela interação entre a praia e a retrobarreira. Estima-se que componham cerca de 15% da linha de costa global, ocorrendo preferencialmente em regiões com relevo suave, suprimento sedimentar significativo e espaço de acomodação controlado pelas variações do nível do mar, topografia antecedente, gradiente do substrato e clima de ondas (Roy *et al.*, 1994; Leatherman, 1988; Dillenburg e Hesp, 2009; Otvos, 2012)

Dentre os diversos tipos morfológicos de barreiras, os sistemas laguna-barreira se destacam por isolarem corpos lagunares, formando paisagens típicas de transgressão marinha ao longo do Holoceno. No Brasil, esses sistemas são expressivos especialmente no sul e sudeste do país, como é o caso do setor sul do Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul (PSDRC), no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, onde predominam barreiras retrogradantes associadas a depósitos de leques de transposição, feições que evidenciam recuo da linha de costa desde o Holoceno médio (Silva, 1987; Rocha *et al.*, 2013; Novak *et al.*, 2024a) (Figura 1).

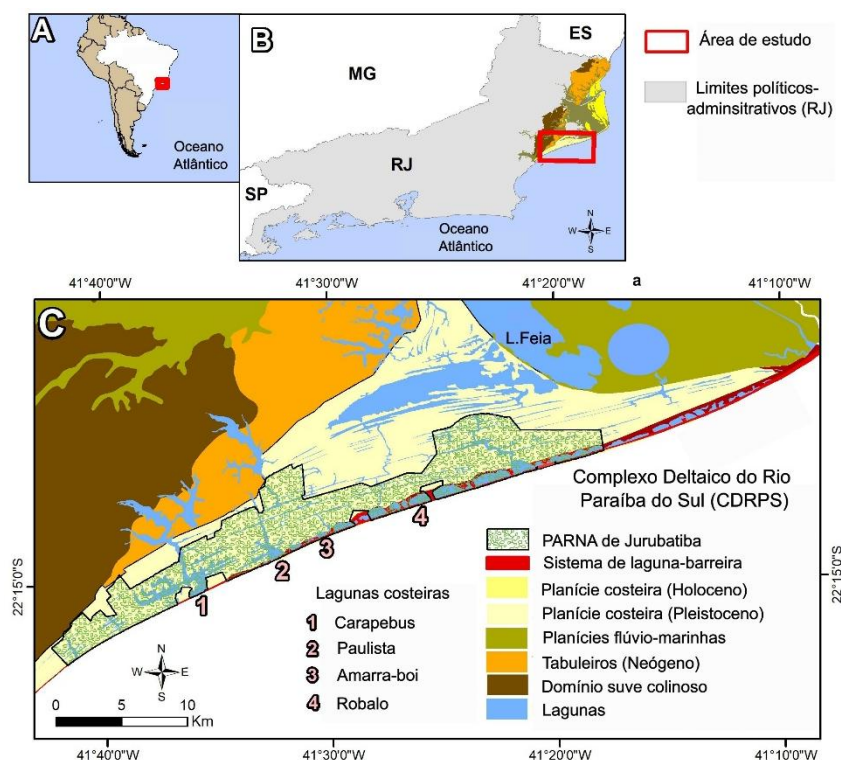


Figura 1: Localização da área de estudo.



A evolução dessas barreiras não é apenas o resultado de processos geológicos milenares, como mudanças no nível relativo do mar, mas também eventos de alta energia em escalas de décadas e episódicas, como tempestades e ciclones extratropicais (Novak *et al.*, 2024b). Tais eventos, associados a barreiras com menor altitude, favorecem o transporte sedimentar em direção à retrobarreira, promovendo o recuo da feição por meio de migração da linha de costa (Sallenger, 2000; Morton e Sallenger, 2003; Oakley, 2021).

Compreender a evolução de barreiras retrogradantes sobre diferentes escalas temporais, do Holoceno ao presente, exige uma abordagem integrada que considere tanto os registros geológicos quanto históricos e eventos de tempestades recentes. Este estudo propõe-se, portanto, a investigar a trajetória evolutiva de uma barreira retrogradante no CDRPS, considerando diferentes escalas de tempo.

METODOLOGIA

A investigação da arquitetura deposicional do sistema laguna-barreira foi conduzida por meio de perfis geofísicos obtidos com radar de penetração no solo (GPR-400Hz), processados no software RADAN 6.6. Um testemunho sedimentar de 2,5m foi coletado na restinga e analisado quanto à granulometria, bioturbação, teor de carbonato e presença de conchas. As análises granulométricas, realizadas por peneiramento (intervalo de 0,5phi), foram processadas no GRANDISTAT e classificadas segundo Udden–Wentworth e Folk e Ward (1957). Duas amostras de conchas foram datadas por radiocarbono AMS (*Accelerator Mass Spectrometry*; OxCal 4.4) e identificadas com base em características ambientais e morfológicas.

A dinâmica da linha de costa entre 1984 e 2020 foi analisada com o CASSIE (*Coastal Analysis via Satellite Imagery Engine*), a partir de imagens orbitais sem cobertura de nuvens. As taxas de variação foram calculadas por regressão linear (LRR), utilizando categorias adaptadas da literatura (Luijendijk *et al.*, 2018): progradação: >0,5 m/ano; estável: entre -0,5 e 0,5 m/ano; erosão: entre -1 e -0,5 m/ano; erosão intensa: < -1 m/ano. A linha de costa lagunar foi mapeada com imagens Landsat 8 (maio de 1984 e agosto de 2020), escolhidas por serem meses secos e com menor risco de superestimativa da área lagunar e analisadas por NDWI (*Normalized Difference Water Index*), no Google Earth Engine. As alterações nas linhas de costas permitiram classificar 5 tipos de



respostas geomórficas, baseados em McBride *et al.* (1995): 1. Acresção/Erosão por influência antrópica: associada a interferências humanas; 2. Equilíbrio dinâmico: ambas as linhas de costa permanecem estáveis no longo prazo; 3. Recuo: a linha de costa oceânica recua, enquanto a da laguna permanece estável; 4. Estreitamento local: recuo simultâneo das linhas de costa e lagunar, reduzindo a largura e volume da barreira; 5. Migração em direção ao continente: ambas as linhas recuam para o continente por processos de transposição de ondas, mas parte do volume sedimentar é mantido.

Entre 2010 e 2019 foram monitorados 8 perfis topográficos de praia com Estação Total, e os volumes sedimentares foram calculados com base no método de Birkmeier (1984), padronizados por uma mesma cota de referência.

Por fim, foram analisados 52 eventos de tempestade entre 2018 e 2021 com base no modelo global de ondas *Wave Watch III*, boletins de avisos de mau tempo da Marinha do Brasil e cartas sinóticas. Paralelamente, imagens *PlanetScope*, com resolução espacial de 3m, foram avaliadas para identificar a formação de leques de transposição por estes eventos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da arquitetura deposicional do sistema no Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul (CDRPS) revelou um padrão retrogradante já estabelecido há aproximadamente 6.700 anos A.P, no Holoceno médio (Muehe e Correa, 1989; Turcq *et al.*, 1999; Pereira *et al.*, 2003). O perfil GPR02, próximo à Barra do Furado, revelou radarfácies inclinadas para o continente (f3a), interpretadas como leques de transposição, seguidas por fácies com inclinação para o mar (f4), associadas à progradação praial e formação de bermas. A presença de superfícies erosivas nessa unidade indica a atuação de tempestades (Figura 2). Apesar da queda do nível relativo do mar desde aproximadamente 5,5ka, por ajustes hidroisostáticos (Angulo *et al.*, 2006), o comportamento transgressivo da barreira persiste, sustentado por registros sedimentares e idades AMS (~6700-6380 anos AP) que indicam a formação precoce da fisiografia do sistema (Martin *et al.*, 1984; Dias e Kjerfve, 2009).

A acumulação sedimentar à jusante dos molhes da Barra do Furado resultou na inversão local do empilhamento retrogradacional para progradacional fenômeno já

documentado na Austrália (McBride *et al.*, 2021) e no sul do Brasil (Dillenburg *et al.*, 2024), mas que na barreira ocorreu após a construção dos molhes, por volta de 1980.

Nas escalas decadal e anual, a retrogradação da barreira não ocorre de forma homogênea. A dinâmica da linha de costa oscila entre setores com erosão intensa e áreas mais estáveis, sugerindo diferentes ritmos de retrogradação ao longo do sistema. Este recuo é mais lento nos perfis P2 e P3 e mais acelerado na área próxima ao guia-corrente norte (Figura 4).

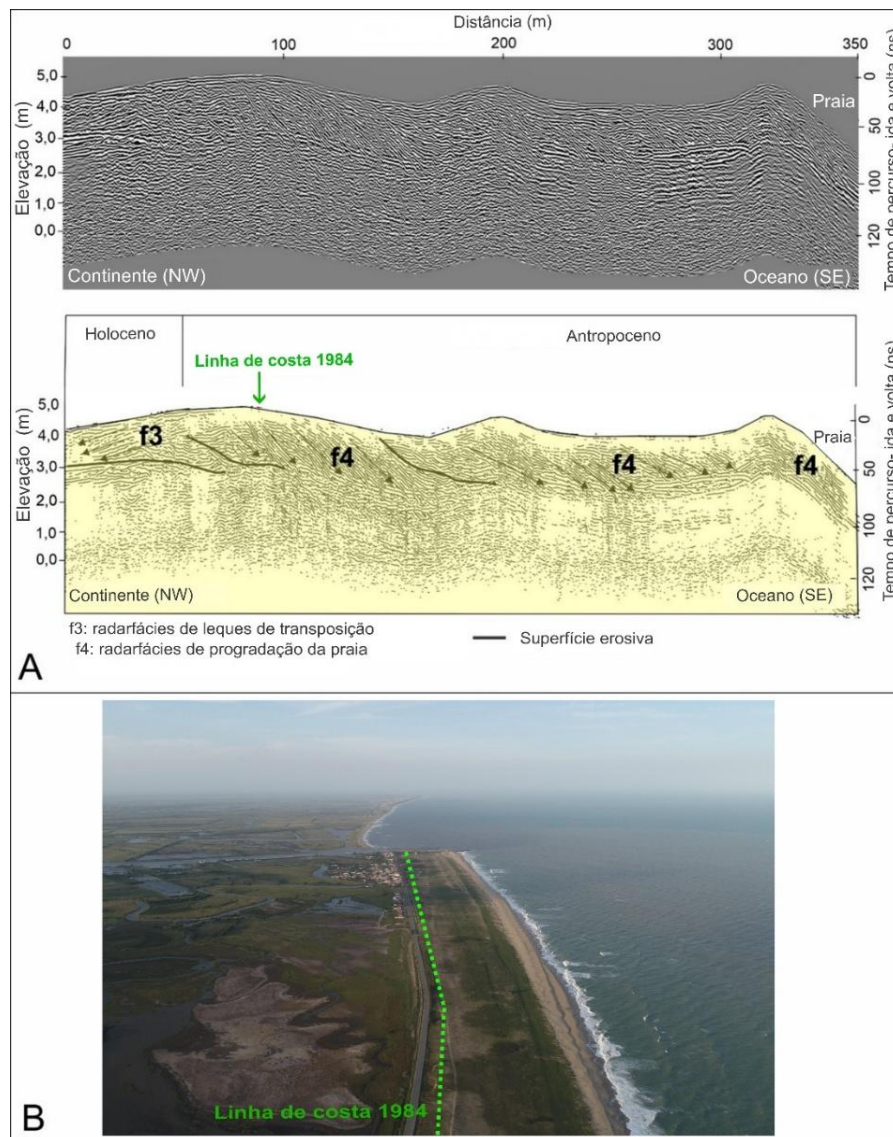


Figura 2: A. Perfil GPR02 (Barra do Furado, CDRPS) mostrando radarfácies de retrogradação (f3a: leques de transposição) e progradacionais (f4: bermas), com superfícies erosivas indicando eventos de tempestades. A linha de costa de 1984 destaca a influência antrópica (guias-corrente) na inversão do padrão sedimentar. B. Foto oblíqua (2019) mostrando a linha de costa de 1984, evidenciando a progradação da barreira neste trecho (Fonte LAGEF-UFF, data: maio de 2019).



Os leques de transposição ocorreram em resposta a tempestades com ondas de 2,9m, direção S-SE, períodos superiores a 8s, duração acima de 48 horas, geralmente durante marés de sizígia e predominantemente em abril, julho e setembro. A presença dos leques está diretamente associada à baixa altitude da barreira (<5m) e possivelmente à sua morfodinâmica refletiva, que pode favorecer o *runup* das ondas (Sallenger, 2000; Matias *et al.*, 2010; Machado, 2010).

Sua recorrência, ainda que não linear, reforça o papel destes processos na retrogradação da barreira. Padrões semelhantes foram observados em Sagar (Paul *et al.*, 2024) e no delta do Ebro (Cabezas-Rabadán *et al.*, 2024), onde tempestades intensas geraram áreas erosivas que moldam a evolução costeira em médio prazo. Um exemplo local são os eventos de tempestades ocorridos em 2020, que geraram deposição significativa de sedimentos para dentro da Lagoa do Paulista. Este processo esteve associado a tempestades com ondas de S-SE (Hs 2,6-3m e período de 14s), durante o período das marés de sizígia e atuação de sistemas frontais com baixa pressão favorecendo ventos intensos e formação de marés meteorológicas (Figura 3).

As respostas geomórficas também estão diretamente relacionadas à frequência e intensidade dos eventos de transposição, fundamentais para a migração da barreira em direção ao continente e para a preservação do seu volume sedimentar. Em mesoescala, a resposta de migração para o continente foi recorrente na área, refletindo a capacidade da barreira em transladar sem perda significativa de volume sedimentar. Os resultados corroboram com a hipótese de que as barreiras podem recuar sem desaparecer, mesmo com a elevação do nível do mar (Cooper *et al.*, 2020). Contudo, também foram observadas respostas de recuo e estreitamento local na porção área central da barreira, o que pode reduzir sua largura e, consequentemente, aumentar a vulnerabilidade destas áreas.

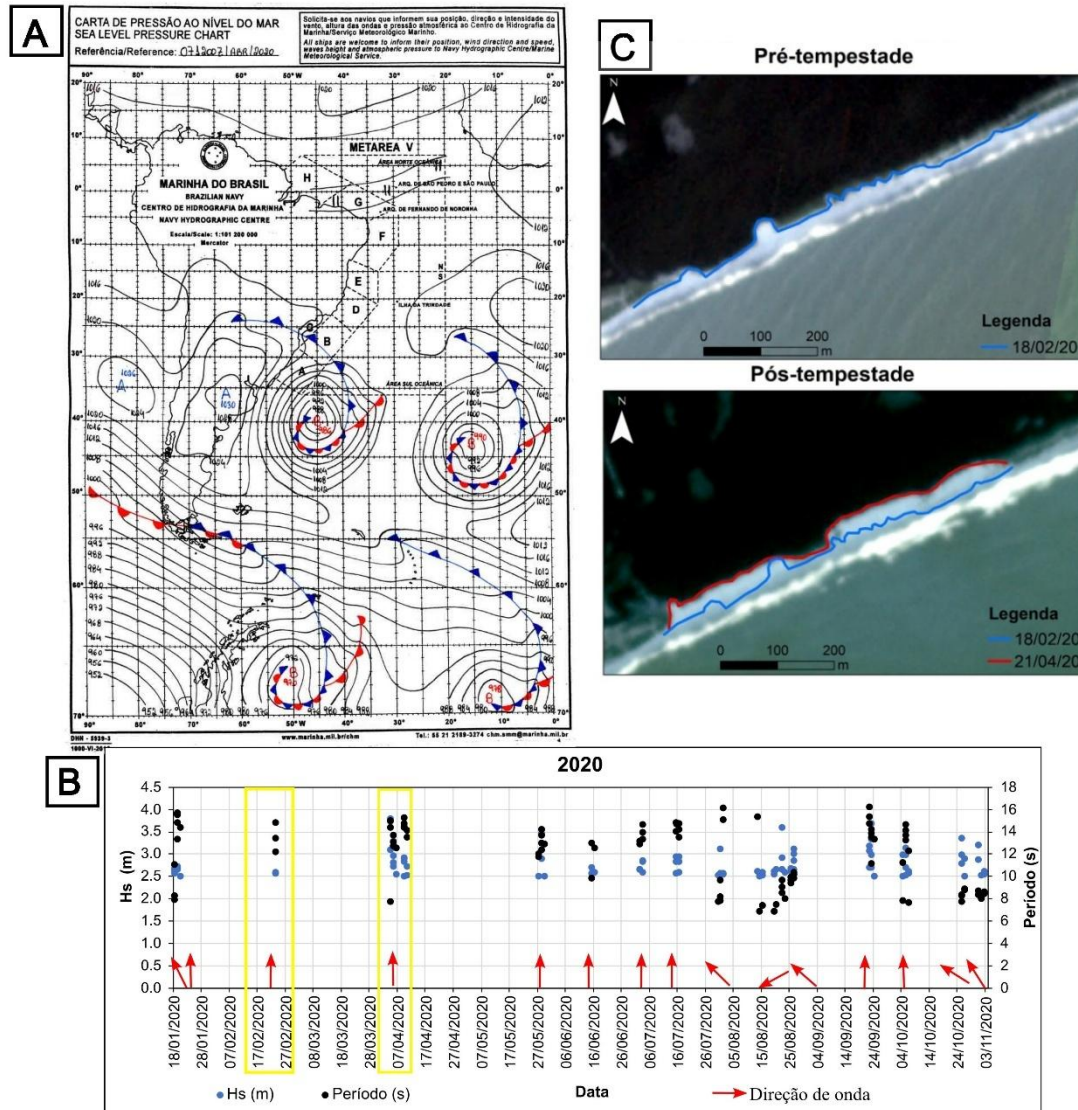


Figura 3: A. Carta sinótica do dia 07/04/2020 (00:00Z) mostrando os sistemas atmosféricos atuantes durante evento de tempestade. B. Gráfico de altura significativa (m) e período (s), e direção das ondas em 2020. O retângulo em amarelo indica os eventos que efetivamente geraram os leques de transposição. C. Mapeamento das alterações na Lagoa do Paulista pré e pós passagem dos eventos de tempestade, cuja linha de costa em azul refere-se ao dia 18/02/2020 e em vermelho refere-se a 21/04/2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A barreira arenosa de Quissamã apresenta uma trajetória retrogradante sustentada por processos que operam em diferentes escalas temporais, desde a formação no Holoceno médio (~6700 anos AP) até às respostas recentes a eventos de tempestades recentes. Apesar da queda relativa do nível do mar nos últimos 5,5mil anos, a

retrogradação permaneceu como tendência dominante, atribuída à redução ao aporte sedimentar e à recorrência de processos de transposição de ondas.

Setores de menor altitude, associados à frequência de tempestades, indicam maior vulnerabilidade, especialmente em áreas urbanizadas. Em contrapartida, o PARNA da Restinga de Jurubatiba representa um importante fator de resiliência, ao impedir ocupações que limitariam a migração natural da barreira, mitigando o efeito de compressão costeira (*coastal squeeze*).

Esse estudo reforça a importância de abordagens multiescalares para compreender a dinâmica costeira e subsidiar estratégias de adaptação frente ao aumento da frequência e intensidade de tempestades.

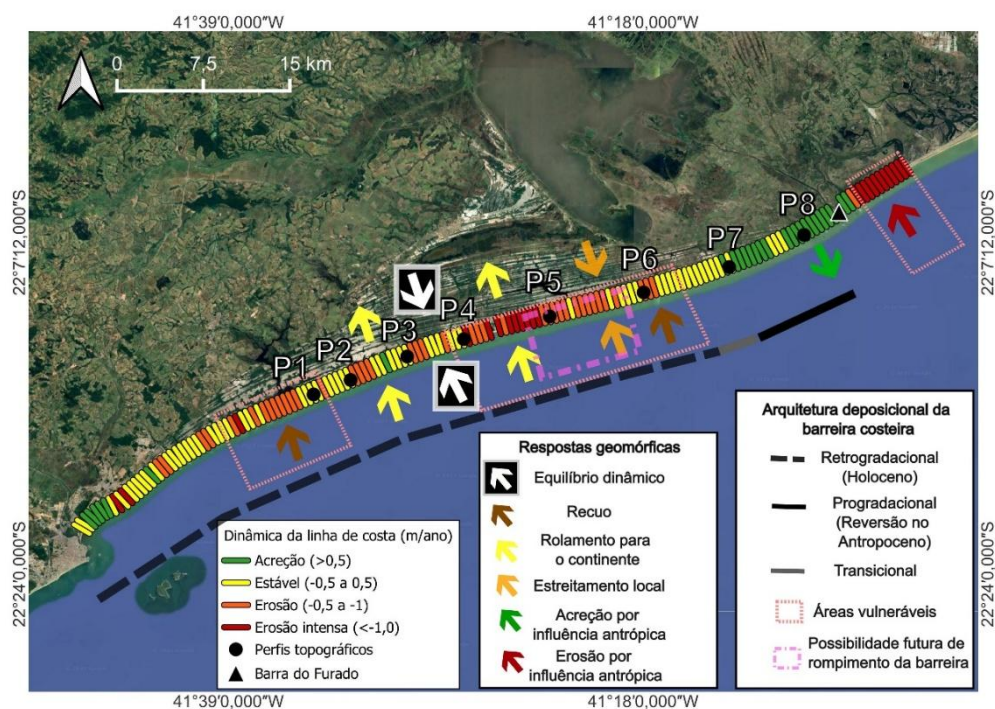


Figura 4: Modelo evolutivo da barreira retrogradante no CDRPS, com base na geologia holocênica e nas respostas da linha de costa.

REFERÊNCIAS

Angulo, R.J., Lessa, G.C., Souza, M.C. de. A critical review of mid-to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quat. Sci. Rev.* 25 (5–6), 486–506. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.03.008> .2006.

Birkemeier, W.A. A user's guide to ISRP: the interactive survey reduction program. In: **Instruction Report CERC-84-1**, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Coastal Engineering Research Center. Vicksburg. 1984.



Blott, S.J., Pye, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. **Earth Surf. Process. Landforms** 26, 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>. 2001.

Cabezas-Rabadán, C.; Pardo-Pascual, J.E.; Palomar-Vázquez, J.; Roch-Talens, A.; Guillén, J. Satellite observations of storm erosion and recovery of the Ebro Delta coastline, NE Spain, **Coastal Engineering**, v.188, p.1-14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104451>.

Cooper, J.A.G., Masselink, G., Coco, G., Short, A., Castelle, B., Rogers, K., Anthony, E., Green, A., Kelley, J., Pilkey, O., Jackson, D. Sandy beaches can survive sea-level rise. **Nat. Clim. Change** 10 (3), 260–263. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2>

Dias, G.T.M., Kjerfve, B. **Barrier and beach ridge systems of the Rio de Janeiro coast**. In: Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*, vol. 1. Springer, Berlin, pp. 225–252. 2009.

Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Springer, p. 380. 2009.

Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Hesp, P.A., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Guadagnin, F. The progradational Curumim barrier in southern Brazil: an archive of sea-level changes, and cyclic aeolian activity in the Holocene. **Geomorphology**, v.448, 109028. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109028>.

Folk, R.L., Ward, W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **J. Sediment. Petrol.** 27, 3–26. 1957.

Oakley, B. Storm Driven Migration of the Napatree Barrier, Rhode Island, USA. **Geosciences**, v. 11, n. 330. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11080330>

Otvos, E.G. Coastal barriers - Nomenclature, processes, and classification issues. **Geomorphology** p. 139–140, v.39–52. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.037>

Leatherman, S.P. *Barrier Island Handbook*. Baltimore, Maryland: **Coastal Publications Series**, Laboratory for Coastal Research, vol. 92p. University of Maryland. 1988.

Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S. The State of the World's Beaches. **Sci. Rep.** v. 8 (n. 1), 1–11. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.

Machado, G.M.V. Análise morfossedimentar da praia, antepraia e plataforma continental interna da linha de costa do Parque Nacional de Jurubatiba - Rio de Janeiro. **Quat. Environ. Geosci.** v. 2 (n. 1–2), 1–17. 2010. <https://doi.org/10.5380/abequa.v2i1-2.13816>.

Martin, L., Suguio, K., Flexor, J.M., Dominguez, J.M.L. **Evolução da planície costeira do rio Paraíba do Sul (RJ) durante o quaternário: influência das flutuações do nível do mar**. Congresso Brasileiro de Geologia. v.33, 84–97. Rio de Janeiro. Anais. 1984.

McBride, R.A., Byrnes, M.R., Hiland, M.W. Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective. **Mar. Geol.** 126, 143–159. 1995. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(95\)00070-F](https://doi.org/10.1016/0025-3227(95)00070-F).

McBride, R.A., Oliver, T.S.N., Dougherty, A.J., Tamura, T., Carvalho, R.C., Short, A.D.S., Woodroffe, C.D. The turnaround from transgression to regression of Holocene barrier systems in



southeastern Australia: geomorphology, geological framework, and geochronology. **Sedimentology**. v. 68 (3), p. 943–986. 2021. <https://doi.org/10.1111/sed.12812>.

Muehe, D.C.E.H., Correa, C.H.T. The coastline between Rio de Janeiro and Cabo Frio. Coastlines of Brazil. **American Society of Civil Engineers**. p.110–123. New York. 1989.

Morton, R., Sallenger, A.H. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. **J. Coast. Res.** v. 19 560–573. 2003.

Paul, S., Mishra, M., Pati, S., Acharyya, T., Santos, C., Silva, R. da Guria, R., Laksono, F. X.A., 2024. Evaluation of overwash vulnerability and shoreline dynamics in cycloneprone Sagar Island, Sundarbans (India). **Sci. Total Environ.** v.907, 167933 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167933> .

Pereira, A.J., Gamboa, L.A.P., Silva, M.A.M., Rodrigues, A.R., Costa, A.A., 2003. Utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) em Estudos de Estratigrafia na Praia de Itaipuaçu - Maricá (RJ). **Revista Brasileira de Geofísica, EDUFF**. Niterói 21 (2), p.163–171.

Rocha, T.B. da, Fernandez, G.B., de Oliveira Peixoto, M.N. Applications of ground penetrating radar to investigate the Quaternary evolution of the south part of the Paraíba do Sul River delta (Rio de Janeiro, Brasil). **Journal of Coastal Research**, Special Issue 65, 570–575. 2013. <https://doi.org/10.2112/si65-097.1>.

Roy, P.S., Cowell, P.J., Ferland, M.A., Thom, B.G. **Wave-Dominated Coasts**. In: Carter, R.W.G., Woodroffe, C.D. (Eds.), Coastal Evolution: Late Quaternary Morphodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 121–186. 1994.

Santos, E.C. dos; Bonetti, J. Sistemas atmosféricos associados a eventos de inundação costeira na Enseada de Tijucas-Santa Catarina. *Rev. Bras. De. Geogr. Física*. v, 14, 2534–2549.2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2534-2549>.

Sallenger, A.H., 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. **J. Coast. Res.** v. 16 (n.3),890–895.

Silva, C.G. **Estudo da evolução geológica e geomorfológica da região da Lagoa Feia, RJ**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Tese.1987.

Turcq, B., Martin, L., Flexor, J.M., Suguio, K., Pierre, C., Tasayaco-Ortega, L. Origin and Evolution of the Quaternary Coastal Plain between Guaratiba and Cabo Frio, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems**, Rio de Janeiro, Brazil. Série Geoquímica Ambiental 6, 25–46.1999.

Novak, L.P.; Rocha, T.B. da; Fernandez, G.B.; Costa, A.P.F. da.; Abreu, B.M. Barrier-lagoon system in the Paraíba do Sul River Deltaic complex (PARNA Jurubatiba, Brazil): Insights into mesoscale behavior and geological influence. **Journal of South American Earth Sciences**. 2024. Volume 145, 105047, ISSN 0895-9811. 2024a. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105047> .

Novak, L.P.; Rocha, T.B. da; Fernandez, G.B.; Oliveira Filho, S.R.de; Mello Filho, M.E.T. de; Pereira, T.G. Regional assessment of overwash processes in a retrograding sand barrier (Paraíba do Sul River Deltaic Complex, Rio de Janeiro, Brazil), **Regional Studies in Marine Science**, Volume 78, 2024b, 103733, ISSN 2352-4855, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103733>.