



## **Considerações sobre a Influência do Modo Anular Sul na Formação de Leques de Transposição em Barreiras Costeiras no Litoral Norte do Rio de Janeiro.**

Marcio Elysio Tavares de Mello Filho <sup>1</sup>  
Beatriz Abreu Machado <sup>2</sup>  
Lígia Padilha Novak <sup>3</sup>  
Thais Baptista da Rocha <sup>4</sup>  
Rosemary Vieira <sup>5</sup>

### **RESUMO**

A passagem de ciclones extratropicais e sistemas frontais sobre o oceano é um fator meteorológico fundamental para a configuração de ressacas que dinamizam o desenvolvimento de feições morfológicas na zona costeira. Durante as ressacas, percebe-se uma elevação do nível do mar a partir da sobre-elevação das ondas, que projetam em direção ao continente depósitos arenosos que dão origem a feições geomorfológicas como leques de transposição. Leques de transposição estão associados ao processo de sobre-lavagem das ondas, em que se verifica transporte de sedimentos em direção ao reverso das barreiras costeiras, o que pode originar processos de retrogradação e impactos em corpos lagunares. Em curto prazo, este processo atua na alteração da morfologia costeira, e a longo prazo, pode atuar como um mecanismo evolutivo associado à transgressão da barreira. Neste sentido, compreender quais mecanismos favorecem as condições meteorológicas que propiciam a transposição e o desenvolvimento dos leques é de suma importância para que haja uma compreensão mais ampla deste processo morfodinâmico. Um dos mecanismos que pode influenciar as condições meteorológicas produtoras de tempestades é o modo de variabilidade climática denominado Modo Anular Sul (SAM, em inglês), associado a anomalias de pressão atmosférica a nível do mar entre as latitudes de 40°S e 65°S. Este modo está relacionado à expansão ou compressão do Vórtice Polar Antártico (VPA) e apresenta duas fases: Positiva e Negativa. Em sua fase Positiva, o VPA se fortalece, e como consequência verifica-se menor troca de energia entre o interior da Antártica e as latitudes médias; em sua fase Negativa, entretanto, o VPA se enfraquece, de modo a promover uma maior troca de energia entre as massas de ar das distintas regiões, o que facilita a formação sistemas transientes produtores de tempestades. Desta forma, entende-se que em sua fase Negativa o SAM favorece a gênese de sistemas atmosféricos que provocam eventos de tempestade, ressacas e, possivelmente, levam à ocorrência de transposição de ondas na zona costeira. Em estudos prévios, 10 eventos de transposição foram identificados no período 2018-2021 no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (PARNA Jurubatiba-RJ), provocados pela passagem de sistemas frontais e pela atuação conjunta de sistemas de alta e baixa pressão atmosférica. O presente trabalho tem por objetivo analisar se a passagem desses sistemas atmosféricos, produtores dos leques de transposição identificados, foi influenciada pelo SAM. Como metodologia, realizou-se uma análise de regressão linear simples para avaliar a relação entre o número de sistemas frontais e o índice SAM no período de 2018 a 2021. Como resultado, verificou-se que em 9 dos 10 eventos, o SAM encontrava-se em sua fase Neutra.

---

<sup>1</sup> Doutorando em Geografia pela Universidade Federal Fluminense - UFF, [marciomello@id.uff.br](mailto:marciomello@id.uff.br);

<sup>2</sup> Doutoranda em Geografia pela Universidade Federal Fluminense - UFF, [abreu\\_beatriz@id.uff.br](mailto:abreu_beatriz@id.uff.br);

<sup>3</sup> Doutora em Geografia pela Universidade Federal Fluminense - UFF, [ligianovak@gmail.com](mailto:ligianovak@gmail.com);

<sup>4</sup> Professora do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, [thaisbaptista@id.uff.br](mailto:thaisbaptista@id.uff.br);

<sup>5</sup> Professora do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, [rosemaryvieira@id.uff.br](mailto:rosemaryvieira@id.uff.br).



Somente o evento registrado em Setembro de 2021 ocorreu enquanto o índice SAM era Positivo. Em quatro ocasiões, entretanto, o SAM apresentou estado Neutro com tendência Negativa, destacando-se os eventos registrados em Abril de 2020 – que apresentou o maior número de sistemas frontais dentro os meses investigados. Estatisticamente, verificou-se que não há relação entre as variáveis analisadas ( $p > 0.05$ ), o que indica a necessidade de análise de outras variáveis possivelmente associadas a este processo.

**Palavras-chave:** Modo Anular Sul; Eventos de Tempestade; Leques de Transposição; Barreiras Costeiras.

## INTRODUÇÃO

Regiões costeiras são ambientes altamente dinâmicos, caracterizados por fatores de ordem geológica, fluvial, oceânica, climática e antrópica. Os processos incidentes (e por vezes dominantes) nestes ambientes são parcialmente responsáveis por sua constituição geomorfológica, dando origem a diferentes feições de relevo em curto, médio e longo prazo (Dalanhese, Sarmiento e Belém, 2019).

O litoral brasileiro, em grande parte marcado pela tipologia do domínio de ondas, apresenta geomorfologia diversificada em função das distintas naturezas dos processos atuantes ao longo de suas compartimentações (Fernandez e Rocha, 2015). Outrossim, entender tais processos é de suma importância para a compreensão da evolução da paisagem litorânea. Em um país cuja linha de costa se aproxima dos 7.500 km de extensão, onde se concentram cerca de 55% de sua população e parte da economia está vinculada à exploração de recursos marinhos ou minerais em plataformas continentais, o estudo destes processos é indispensável.

Neste sentido, a interface oceano-atmosfera é um dos principais mecanismos a influenciar a configuração de condições ambientais que propiciam a evolução de feições geomorfológicas na zona costeira. A passagem de ciclones e sistemas frontais, ou o posicionamento de anticiclones semifixos, são exemplos de como diferentes condições atmosféricas resultam em distintas condições climáticas e/ou oceanográficas que, por fim, atuam na evolução da paisagem costeira (Ribeiro, Gomes e Bulhões, 2016).

Um dos principais testemunhos morfológicos da interação oceano-atmosfera na zona costeira são os leques de transposição, feições associadas à ocorrência de eventos de tempestade e ressacas em que se percebe o processo de sobrelavagem enquanto resposta à passagem de ciclones ou frentes, ocasionando o transporte de depósitos arenosos marinhos em direção ao reverso de barreiras costeiras. Em curto prazo, leques de transposição alteram a morfologia costeira; a longo prazo, estão associados ao



processo evolutivo de transgressão da barreira e retrogradação da linha de costa (Silva et. al., 2008).

Entre os anos de 2018 e 2021, Novak et. al. (2024) identificaram a formação de leques de transposição ao longo do sistema barreira-laguna do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (PARNA Jurubatiba), no Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul, região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro. O estudo aponta que os leques foram formados a partir da passagem de frentes frias e ciclones extratropicais próximos à costa, o que de acordo com Santos e Bonetti (2021) é o principal padrão atmosférico associado a eventos de tempestade que provocam inundações costeiras no sul do Brasil, sendo possível que este mesmo padrão se repita na região Sudeste.

Os sistemas frontais e ciclones extratropicais que cruzam a costa brasileira são formados em zonas ciclogênicas ao longo do Atlântico Sul. De acordo com Oliveira et. al. (2021), a maior parte desses sistemas é formada entre a Península Antártica e o Sul do Brasil, especialmente em virtude do contraste entre as temperaturas dessas regiões. No entorno da latitude de 60°S, o choque entre massas de ar quente e frio, assim como das massas d'água subjacentes, propicia a formação desses sistemas que provocam eventos de tempestade e causam danos nas regiões costeiras do Sul e Sudeste brasileiros (Cardozo, Reboita e Garcia, 2015).

Entre as latitudes de 40°S e 65°S, o modo de variabilidade climática denominado Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* - SAM) pode influenciar a quantidade e a intensidade dos sistemas transientes que geram eventos de ressaca na costa brasileira (Dalanhese, Sarmiento e Belém, 2019). Caracterizado como um modo de variabilidade intramensal vinculado a anomalias de pressão atmosférica a nível do mar, o SAM apresenta fases Positiva e Negativa que indicam menor ou maior troca de energia entre as latitudes médias (América do Sul) e altas (Antártica), respectivamente (Fogt e Marshall, 2020).

De acordo com Cardozo, Reboita e Garcia (2015) as anomalias de pressão atmosférica que caracterizam o SAM repercutem diretamente no fortalecimento ou enfraquecimento do Vórtice Polar Antártico (VPA). Em suma, ao fortalecer a pressão do VPA (fase Positiva), o SAM dificulta a troca de energia entre as latitudes médias e altas, o que resulta em menos sistemas transientes. Entretanto, em sua fase Negativa, quando ocorre a diminuição da pressão atmosférica e o consequente enfraquecimento do



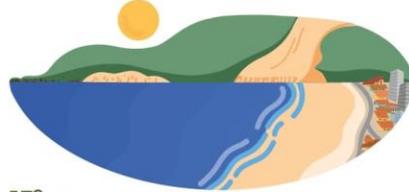
VPA, percebe-se maior troca de energia entre as latitudes médias e a Antártica, o que pode gerar maior fluxo de sistemas transientes.

Diante disto, este trabalho busca investigar uma possível relação entre o SAM e a formação de leques de transposição catalogados por Novak et. al. (2024) no litoral Norte do Rio de Janeiro. Duas hipóteses são levantadas: a primeira está relacionada à fase Negativa do SAM, onde entende-se que a maior troca de energia entre as diferentes latitudes propicia a formação de mais sistemas transientes e conseqüentemente maior número de leques de transposição. A segunda hipótese, contudo, está relacionada à fase Positiva do SAM, que pode contribuir para o fortalecimento das massas de ar polar que, ao conseguirem romper o bloqueio do VPA, atingem a América do Sul com maior intensidade e alcançam latitudes mais baixas, provocando eventos de ressaca mais intensos e conseqüentemente a formação de leques de transposição nessas regiões.

## **ÁREA DE ESTUDO**

O Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (PARNA Jurubatiba) abrange 44 km de linha de costa do litoral dos municípios de Quissamã e Carapebus, região Norte do estado do Rio de Janeiro. O parque abriga 18 lagoas costeiras, estando inserido no contexto do setor sul do Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul (CDRPS), que representa um conjunto de ambientes sedimentares relacionados a diferentes fases evolutivas do rio Paraíba do Sul. O PARNA Jurubatiba encontra-se no trecho abandonado do CDRPS, em uma planície costeira pleistocênica cujas bordas apresentam lagoas costeiras confinadas pela barreira holocênica (Novak et. al, 2024).

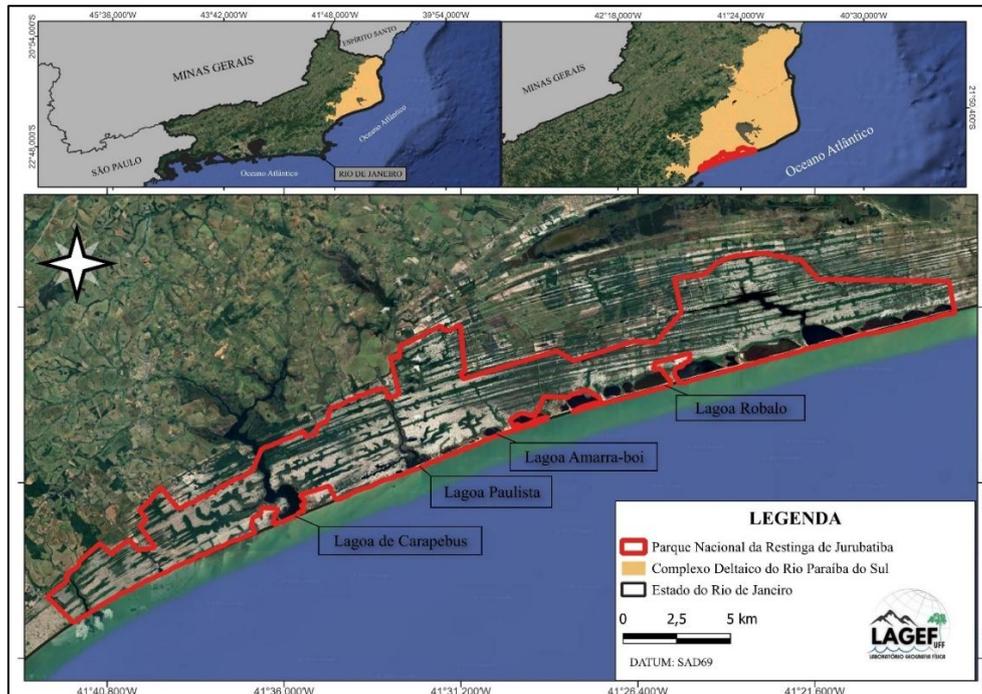
Fernandez e Rocha (2015) caracterizam o setor meridional do CDRPS como um sistema barreira-laguna, cuja origem pode estar associada ao afogamento de áreas deprimidas no reverso das barreiras costeiras em virtude das oscilações do nível médio do mar, especialmente após o máximo transgressivo ocorrido há aproximadamente 120 mil anos (Martin et al., 1984). Na escala de análise interdecadal, Novak et al. (2024) apontam que um dos mecanismos de retrogradação da barreira ocorre a partir dos efeitos de transposição das ondas como conseqüência da passagem de frentes frias e ciclones ao longo da costa, o que pode ocasionar a formação de leques de transposição. Isto evidencia mais uma vez a importância do presente estudo, uma vez que este se propõe a auxiliar na busca de um entendimento mais completo do processo de



## 15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

retrogradação da barreira em escala interdecadal. A Figura 1 expõe a localização do PARNA Jurubatiba no contexto do CDRPS, Rio de Janeiro.

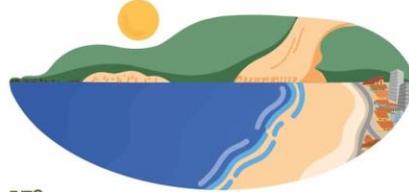
**Figura 1 – Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba no contexto do Complexo Deltaico do Rio Paraíba do Sul, litoral Norte do Rio de Janeiro.**



Fonte: os autores.

A orientação NE-SO deste setor do litoral indica maior pré-disposição aos efeitos da passagem de sistemas transientes que vêm de Sul, Sudeste e Sudoeste (Dereczynski e Menezes, 2015; Bulhões et. al., 2016), embora a região como um todo esteja submetida na maior parte do ano à influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) – associado à condições de bom tempo. Os ciclones e frentes frias que vêm de Sul e Sudoeste trazem nebulosidade e chuva típicos, além dos fortes ventos gerados pelos sistemas de baixa pressão. Já os anticiclones migratórios polares, quando posicionados à Sudeste, provocam mau tempo ao gerar ventos e ondas que evoluem de sul-sudeste para leste, atingindo o zona costeira (Parente et. al., 2015).

Neste sentido, entende-se que a área de estudo se encontra na rota de sistemas transientes que provocam ressacas, responsáveis pelo processo de empilhamento de ondas e transporte de sedimentos marinhos para o reverso das barreiras costeiras, formando leques de transposição, o que indica a evolução do sistema barreira-laguna em retrogradação (Figura 2).



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE  
**GEOMORFOLOGIA**

**Figura 2 – Registro de leque de transposição no reverso da barreira holocênica.**



Fonte: Acervo de fotos do Laboratório de Geografia Física (UFF).

## **METODOLOGIA**

Inicialmente, foram selecionados os eventos de transposição mais significativos identificados pelo estudo de Novak et. al. (2024). A partir desta etapa, foram coletados junto à *National Oceanic and Atmospheric Agency* (NOAA) os índices do Modo Anular Sul (*SAM Index*) para cada mês em que houve o registro de um evento de transposição. Assim, obteve-se um cenário geral e preliminar da possível influência do SAM sobre a formação dos leques de transposição. Em seguida, dados referentes aos sistemas frontais foram coletados junto à Coordenação Geral de Ciências da Terra do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CGCT/INPE) por meio do Núcleo de Comunicação da CGCT (NUCOM). Também foram coletadas sínteses sinóticas produzidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) para caso houvesse falha de dados no conjunto do CGCT. A Tabela 1 expõe a relação dos dados adquiridos.

**Tabela 1 – Relação de dados levantados para a confecção do estudo.**

<b>EVENTO DE TRANSPOSIÇÃO</b>	<b>ÍNDICE SAM</b>	<b>NÚMERO DE SISTEMAS FRONTAIS</b>
5 a 7 de Julho de 2018	0,377	7
11 a 12 de Julho de 2018	0,377	7
5 a 7 de Julho de 2019	-0,390	8
19 a 23 de Julho de 2019	-0,390	8
23 a 24 de Fevereiro de 2020	0,275	4
4 a 6 de Abril de 2020	-0,475	9
9 a 12 de Abril de 2020	-0,475	9
13 a 15 de Abril de 2021	0,827	2
20 a 24 de Abril de 2021	0,827	2
22 a 25 de Setembro de 2021	1,336	5

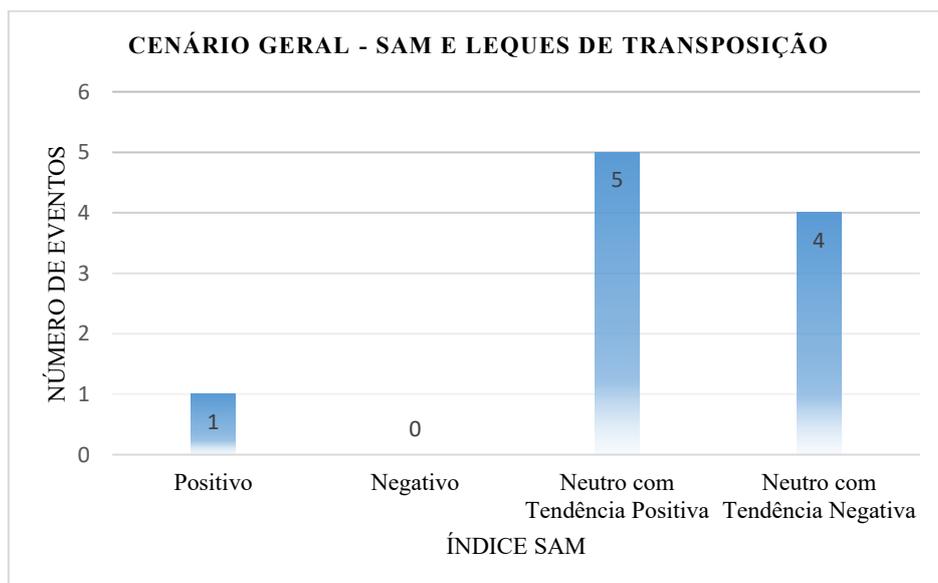
O número de sistemas frontais identificados na costa brasileira foi analisado em razão do índice SAM registrado do mês do evento de transposição. Desta maneira, seria possível traçar um cenário geral acerca de uma possível relação entre o número frentes e o SAM, considerando as hipóteses levantadas neste trabalho.

Para testar a relevância estatística dos dados, foi utilizada uma análise de regressão linear simples a partir do software R. A aplicação deste teste estatístico teve por objetivo avaliar a correlação entre o número de sistemas frontais e o índice SAM no período de 2018 a 2021. Desta forma, a depender do resultado, seria possível identificar uma possível influência do SAM na incidência de sistemas frontais na região de estudo, o que poderia indicar, por consequência, uma relação entre o SAM e os leques de transposição catalogados por Novak et. al. (2024).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que a maior parte dos eventos de transposição (9) ocorreram enquanto o SAM encontrava-se em fase Neutra. Dos dez eventos catalogados, apenas um evento ocorreu enquanto o SAM encontrava-se em fase Positiva, não sendo identificados eventos em que o SAM apresentava fase Negativa. A Figura 3 demonstra a ocorrência de leques de transposição em função das fases do índice SAM.

**Figura 3 – Ocorrência de leques de transposição em função do Índice SAM.**



Fonte: NOAA; Novak et al., 2024.



Apesar da predominância do SAM em seu estado Neutro ao longo da maioria dos eventos (9), foi observado que 5 eventos ocorreram enquanto o SAM apresentava uma Tendência Positiva, ao passo que em outros 4 eventos o SAM encontrava-se em estado de neutralidade com Tendência Negativa.

Desta forma, é possível inferir que os leques de transposição ocorreram, em sua maioria, em situação de SAM Neutro com Tendência Positiva ou SAM Positivo, totalizando 6 eventos. Esta inferência reforça a segunda hipótese deste estudo, que aponta que em situações de SAM Positivo, quando as massas de ar frio encerram-se por mais tempo no interior da Antártica e se fortalecem, os sistemas transientes avançam com mais força e alcançam latitudes mais baixas com maior intensidade, apesar da menor frequência.

Os números relativos à frequência mensal de sistemas frontais na costa brasileira reforçam esta hipótese. Enquanto os meses com maiores tendências negativas (Abril de 2020 e Julho de 2019) apresentaram os maiores números de sistemas frontais (9 e 8, respectivamente), não se pode afirmar que estes sistemas tenham sido potencialmente significativos, pois foi identificada a ocorrência de leques de transposição em apenas dois eventos em cada um dos meses.

A situação de Abril de 2021 reforça esta interpretação: foram identificados apenas dois sistemas transientes ao longo do mês em destaque, ao passo que as passagens desses sistemas provocaram a formação de leques de transposição em momentos diferentes (entre 13 e 15 de Abril; entre 20 a 24 de Abril). Pode-se inferir, portanto, que as duas passagens de sistemas frontais em Abril de 2021 foram capazes de gerar leques de transposição no PARNA Jurubatiba, o que abre possibilidade para inferir que a formação dos leques foi provocada por sistemas mais fortes, potencializados pelo encerramento do ar polar na Antártica. Neste sentido, entende-se que apesar de os sistemas passarem em menor quantidade em situação de SAM Positivo, talvez sejam mais potentes, ocasionando a formação de leques de transposição com maior facilidade.

Apesar destes resultados, os dados levantados não são suficientemente robustos para afirmar que a formação de leques de transposição é mais comum em situação de SAM Positivo ou Neutro com Tendência Positiva. Após submeter os índices SAM mensais e o número de sistemas frontais mensais à uma análise de regressão linear simples, com o objetivo de verificar uma correlação estatística entre as variáveis, observou-se o valor de  $p > 0.05$  em todos os anos do período 2018 a 2021,



demonstrando não haver correlação estatística entre as variáveis. Contudo, é importante ressaltar que este resultado estatístico pode estar atrelado à natureza predominantemente Neutra do índice SAM no período analisado, assim como outros fatores como a série histórica restrita, ou a própria variável analisada (número de sistemas frontais). É possível que variáveis como vento, precipitação e temperatura apresentem valores de maior significância estatística.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho se propôs a analisar a possível influência do SAM na formação de leques de transposição ao longo do PARNA Jurubatiba, litoral Norte do estado do Rio de Janeiro.

Como resultado, foi possível observar que os leques foram formados ao longo de meses em que o SAM encontrava-se Neutro, embora houvesse Tendência Positiva em 5 eventos e situação de SAM Positivo em um evento.

É possível que a formação de leques de transposição seja mais comum ao longo de meses de SAM em fase Positiva, graças à potencialização conferida às massas de ar polar, que propiciam frontogênese mais violenta e eventos de tempestades mais significativos.

Apesar desta inferência, a análise de regressão linear não apontou correlação estatística entre o índice SAM e os sistemas frontais que produziram os leques de transposição. Este resultado demonstra que são necessários mais estudos para entender a influência do SAM nas dinâmicas ambientais da América do Sul, sendo necessárias análises de mais variáveis meteorológicas e também oceanográficas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Laboratório de Geografia Física (LAGEF) e ao Laboratório de Processos Sedimentares e Ambientais (LAPSA), ambos da Universidade Federal Fluminense, pelo suporte ao longo desta pesquisa.

## **REFERÊNCIAS**

BULHÕES, E. et al. Coastal impacts induced by storm waves between Cape Frio and Cape Búzios, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**, n. 75, 1047-1051, 2016.



CARDOZO, A. B.; REBOITA, M. S.; GARCIA, S. R. Climatologia de Frentes Frias na América do Sul e sua Relação com o Modo Anular Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 17, 9-26, 2015.

DALANHESE, L. A.; SARMENTO, T. L.; BELÉM, A. L. Teleconexões entre o El Niño Oscilação Sul e o Modo Anular Austral em Eventos Extremos de Onda nas Regiões Oceânicas Sul e Sudeste do Brasil. *In*: RODRIGUES, T. A.; NETO, J. L.; GALVÃO, D. O. **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Agroecologia 4**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. p. 26-37.

DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. Meteorologia da Bacia de Campos. *In*: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, vol.2, 2015. p. 1-54.

FERNANDEZ, G. B.; ROCHA, T. B. Barreiras Costeiras Holocênicas: Geomorfologia e Arquitetura Depositional no Litoral do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 16, p. 301-319, 2015.

FOGT, R. L.; MARSHALL, G. J. The Southern Annular Mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. **WIREs Climate Change**, n. 11, p. 1-24, 2020.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M. As flutuações de nível do mar durante o quaternário superior e a evolução geológica de “deltas” brasileiros. **Boletim IG-USP**. Publicação Especial, n.15. 1993.

NOVAK, L. P. et al. 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**, n. 78, p. 1-17, 2024.

OLIVEIRA, M. M. F. et al. Extreme climatic characteristics near the coastline of the southeast region of Brazil in the last 40 years. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 146, p. 657-674, 2021.

PARENTE, C. E. et al. Climatologia de Ondas. *In*: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, vol.2, 2015. p. 55-96, 2015.

RIBEIRO, M. G.; GOMES, T. B.; BULHÕES, E. M. R. Respostas Morfodinâmicas e Fisiográficas da Zona Costeira ao Norte da Bacia de Campos Frente à Eventos de Tempestade. **Revista Tamoios**, n. 2, p. 91-111, 2016.

SANTOS, E. C.; BONETTI, J. Sistemas Atmosféricos Associados a Eventos de Inundação Costeira na Enseada de Tijucas – Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 14, p. 2534-2549, 2021.

SILVA, A. L. C. et al. Retrogradação da Barreira Arenosa e Formação de Leques de Arrombamento na Praia de Itaipuaçu (Oeste de Maricá, RJ). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 75-82, 2008.