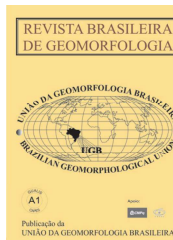


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 1 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1507>



ESTIMATIVA DA TAXA ANUAL E SAZONAL DO TRANSPORTE LONGITUDINAL SEDIMENTAR NA ZONA COSTEIRA DO LITORAL ORIENTAL DO RIO GRANDE DO NORTE

ESTIMATION OF THE ANNUAL AND SEASONAL RATE OF SEDIMENTARY LONGITUDINAL TRANSPORT IN THE COASTAL ZONE OF THE EASTERN COAST OF THE RIO GRANDE DO NORTE

Maria de Fátima Alves de Matos

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
ORCID: 0000-0002-2864-2027
E-mail: mfatimaalves.m@gmail.com*

Daniel de Freitas Gurgel

*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
ORCID: 0000-0002-1914-0535
E-mail: danielfreitas15@gmail.com*

Ada Cristina Scudelari

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
ORCID: 0000-0001-7594-1196
E-mail: adaufrn@gmail.com*

Venerando Eustáquio Amaro

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Av. Salgado Filho, s/n, Natal, Rio Grande do Norte. CEP 59078-970, Brasil
ORCID: 0000-0001-7357-2200
E-mail: venerando.amaro@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
08/08/2018
Aceito (Accepted):
12/09/2019

Palavras-chave:

Erosão Costeira; Métodos Interpoladores; Regime de Ondas; Praias Arenosas; Falésias.

Resumo:

No Estado do Rio Grande Norte, os eventos de erosão costeira ao longo da linha de costa vêm se intensificando no decorrer das últimas décadas. Os principais trechos afetados pela erosão costeira têm esse fenômeno atribuído, sobretudo, ao reduzido aporte fluvial de sedimentos, decorrentes das pequenas dimensões das bacias fluviais regionais, com frequentes barragens artificiais, e do desenvolvimento dos campos dunares decorrentes da perda de sedimentos das praias para o continente. Entretanto, o conhecimento do clima de ondas e da taxa de transporte de sedimentos ocorrentes na faixa litorânea são fatores fundamentais nos estudos sobre a erosão costeira. Este trabalho abordou como área de interesse a faixa

Keywords:

Coastal Erosion; Interpolator Methods; Wave Climate; Sandy Beach; Cliffs.

litorânea da Barreira do Inferno e praias adjacentes, localizada em setor ao sul da capital, Natal/RN. Os objetivos principais incidiram em (i) avaliar métodos interpoladores para estimar a influência da batimetria na definição do transporte longitudinal de sedimentos (TLS); (ii) por meio do pacote computacional SMC-Brasil, modelar os processos físicos de geração, propagação e modificação do

clima de ondas, com o intuito de distinguir a hidrodinâmica na área de estudo; (iii) estimar o TLS a partir da formulação de Bayram *et al.* (2007). Os resultados mostraram que o clima de ondas na faixa litorânea da Barreira do Inferno possui maior tendência de ondas provenientes de E e ESE. O potencial de TLS anual é da ordem de 50.000m³/ano no sentido Sul-Norte. O período chuvoso (meses de junho, julho e agosto) é o de maior contribuição para o transporte médio anual, aliado ao maior aporte de sedimentos do continente em direção à faixa litorânea.

Abstract:

In the State of Rio Grande Norte, coastal erosion events along the coastline have intensified over the past few decades. The main sectors affected by coastal erosion have this phenomenon attributed, especially to the reduced fluvial contribution of sediments, due to the small dimensions of regional river basins, with frequent artificial dams, and the development of dune fields resulting from the loss of sediment from beaches toward the continent. However, knowledge of the wave climate and the rate of sediment transport occurring in the coastal range are fundamental factors in studies on coastal erosion. This work addressed as an area of interest the coastal region of Barreira do Inferno and adjacent beaches, located in sector south of the capital, Natal /RN. The main objectives focused on (i) evaluating interpolating methods to estimate the influence of bathymetry on the definition of longitudinal sediment transport (LST); (ii) through the computational package SMC-Brazil, model the physical processes of generation, propagation and modification of the wave climate, in order to distinguish hydrodynamics of the study area; (iii) estimate LST from the formulation of Bayram *et al.* (2007). The results showed that the wave climate in the coastal region of Barreira do Inferno has a higher trend of waves from E and ESE. The potential of annual LST is around 50,000m³/year in the South-North direction. The rainy season (June, July and August) is the most contributing to annual average transportation, combined with the continent largest sediment contribution towards the coastal zone.

1. Introdução

Nas últimas décadas, grande parte das regiões costeiras do mundo tem apresentado um forte incremento na densidade populacional (Bird, 2008; Neumann *et al.* 2015). A pressão sobre os ambientes costeiros, com o aumento na taxa de urbanização, tem sido intensificada pela tendência socioeconômica na migração costeira, impulsionada por políticas de desenvolvimento econômico, como instalações portuárias, industriais diversas e do turismo, ou mesmo para evitar os conflitos ou excessos populacionais em regiões continentais interiores (Roberts e Hawkins, 1999; Brown e McLachlan, 2002; Nordstrom e Mauriello, 2001). Esta ocupação antrópica, com a construção de infraestruturas diversas, se estabelece sobretudo afetando o sistema praias-dunas e adjacências estuarinas, mas igualmente sobre áreas como os platôs nos topos de falésias marinhas (Dewez *et al.*, 2013).

Este cenário, marcado por interconexões com-

plexas entre ações naturais (meio físico e biótico) e antropogênicas (socioeconômico), quando submetido à gestão costeira inadequada, tem provocado desequilíbrios no balanço sedimentar costeiro, com o avanço acelerado dos processos erosivos em extensos setores litorâneos (Busman *et al.*, 2014; Amaro *et al.*, 2015; Scudelari *et al.*, 2016). Em alguns setores de praias e falésias ativas do mundo, as taxas médias anuais de recessão da linha de costa já tem registrado mais de 40 m, especialmente, em praias frontais às falésias sedimentares relativamente menos resistentes, a exemplo de regiões como as praias arenosas e areno-lamosas do litoral oriental do Nordeste brasileiro (Bird, 2015).

Os processos marítimos e continentais, além das ações antropogênicas, são determinantes na análise da estabilidade de falésias ao processo erosivo, sendo os fatores principais: a ação direta das forças hidrodinâmicas marinhas (clima de ondas, correntes e flutuações de marés) que, frequentemente, provocam incisões basais nos taludes; junta-se a esses fatores outros como

as oscilações do nível médio do mar e as alterações nas condições climáticas; as variações nas taxas de precipitação, que pode causar movimentos de massa por perda na resistência do talude, em decorrência do acréscimo no grau de saturação do solo, especialmente em trechos dos platôs fraturados e onde ocorre a supressão vegetal. De acordo com Brossard e Duperré (2004), a estabilidade das falésias depende também de propriedades físicas inerentes, como suas características composicionais, estruturais, mecânicas e hidráulicas.

Diversos fatores marinhos desencadeiam os processos erosivos e deposicionais atuantes nos ambientes costeiros e estuarinos, e são elementos decisivos na evolução da linha de costa. A interação entre os componentes energéticos (ventos, clima de ondas, correntes e flutuações de marés) e os composicionais (tipo de sedimentos e de águas) é responsável pelas alterações detectadas nesses ambientes e o conjunto dos processos erosivos e deposicionais integrados satisfazem a um mecanismo de retroalimentação (Bird, 2008). Logo, o transporte litorâneo de sedimentos, conduzido pela dinâmica dos fluidos, é fator determinante nas mudanças morfológicas contínuas observadas nas zonas costeiras (Cowell e Thom, 1995).

O transporte longitudinal de sedimentos (TLS) ou a deriva litorânea é um dos principais responsáveis pelas alterações no modelado costeiro (USACE, 1984). A compreensão quantitativa do TLS na faixa litorânea é essencial como subsídio aos projetos de proteção costeira contra ação erosiva e na manutenção operacional dos canais de navegação (Shanas e Kumar, 2014). Naturalmente, há uma tendência pelo equilíbrio dinâmico nos volumes transportados de sedimentos, considerados os períodos extremos de agitação marítima como, por exemplo, em regiões sujeitas a tempestades em que os sedimentos removidos em épocas de tempestade voltam a ser depositados nos períodos pós-tempestade. Contudo, quando ocorrem obstruções à deriva litorânea como, por exemplo, pela presença de promontórios naturais ou estruturas artificiais, o equilíbrio dinâmico é rompido perturbando o perfil de equilíbrio natural da praia (Komar, 1998).

Muitos dos processos costeiros relativos ao TLS dependem das condições locais de forçamento dos componentes energéticos (Poleykett *et al.*, 2018). A previsão de cenários quantitativos de processos costei-

ros e a evolução da morfodinâmica costeira através de modelagem numérica são possíveis devido aos avanços realizados no decorrer dos últimos anos na compreensão dos processos físicos (Shanas e Kumar, 2014) e técnicas de modelagem matemática (Jiang *et al.*, 2010). Do mesmo modo dependem da qualidade das informações que descrevem as condições ambientais na zona costeira, do reconhecimento dos processos físicos e da qualidade e quantidade dos dados usados na calibração dos modelos numéricos (Mafi *et al.*, 2013; Güner *et al.*, 2013).

Para o litoral leste do Estado do Rio Grande Norte (RN), a estimativa da taxa de TLS foi relatada em diferentes setores. Por exemplo, Fernandez e Amaral (2013) avaliaram a evolução temporal e padrões espaciais dos campos de dunas móveis e dos sedimentos da paisagem costeira desse litoral, enquanto Araújo *et al.* (2015) estudaram a evolução decadal da taxa de TLS em praias urbanas da cidade de Natal, capital do RN. Esses autores constataram que entre a década de 50 a 70 ocorreu diminuição da carga sedimentar, seguido de aumento até a década de 2000, com a equação de Bayram *et al.* (2007) estimando as maiores taxas de transporte, sendo dominante o transporte no sentido de sul para norte (S-N). Amaro *et al.* (2014) estudaram a erosão costeira da praia de Ponta Negra, também em Natal, e determinaram as taxas de erosão entre 2003 e 2012 em 8.923,13 m². Gurgel (2017) estudou o transporte de sedimentos na praia da Barreira do Inferno confirmando o transporte predominante no sentido S-N, e concluindo que a maior contribuição da taxa TLS médio anual ocorre no período chuvoso, especificamente entre os meses de junho a agosto.

A maior parte dos estudos mencionados foram baseados em formulações empíricas, tais como CERC (USCE, 1984), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007). Assim, com base nas análises obtidas por Araújo *et al.* (2015) e Gurgel (2017), o objetivo principal deste trabalho é quantificar o potencial do TLS por ação das ondas na área frontal e adjacente da Barreira do Inferno, litoral leste do RN, além de analisar a sua variabilidade espacial e sazonal, por meio da formulação de Bayram *et al.* (2007) do modelo numérico do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil). Segundo Araújo *et al.* (2015) o método de Bayram *et al.* (2007) destaca os sedimentos dispostos em suspensão na coluna d'água pela ação das ondas é aquele predominante no transporte na zona de arrebentação.

2. Caracterização da Área de Estudo

2.1 Localização da Área

A área de estudo encontra-se localizada entre os municípios de Natal e Parnamirim entre as coordenadas 05°52'5,73"S/35°0'42,39"W e

06°0'43,18"S/35°10'30,44"W (Figura 1). Este setor de costa oceânica está limitado pelas praias urbanas de Ponta Negra ao norte e de Cotovelo ao sul, envolvendo relevante ecossistema de praias-dunas consolidado como Zona de Proteção Ambiental nº6 (ZPA-6) no Plano Diretor do Natal (Lei Municipal nº82 de 21 de junho de 2007).

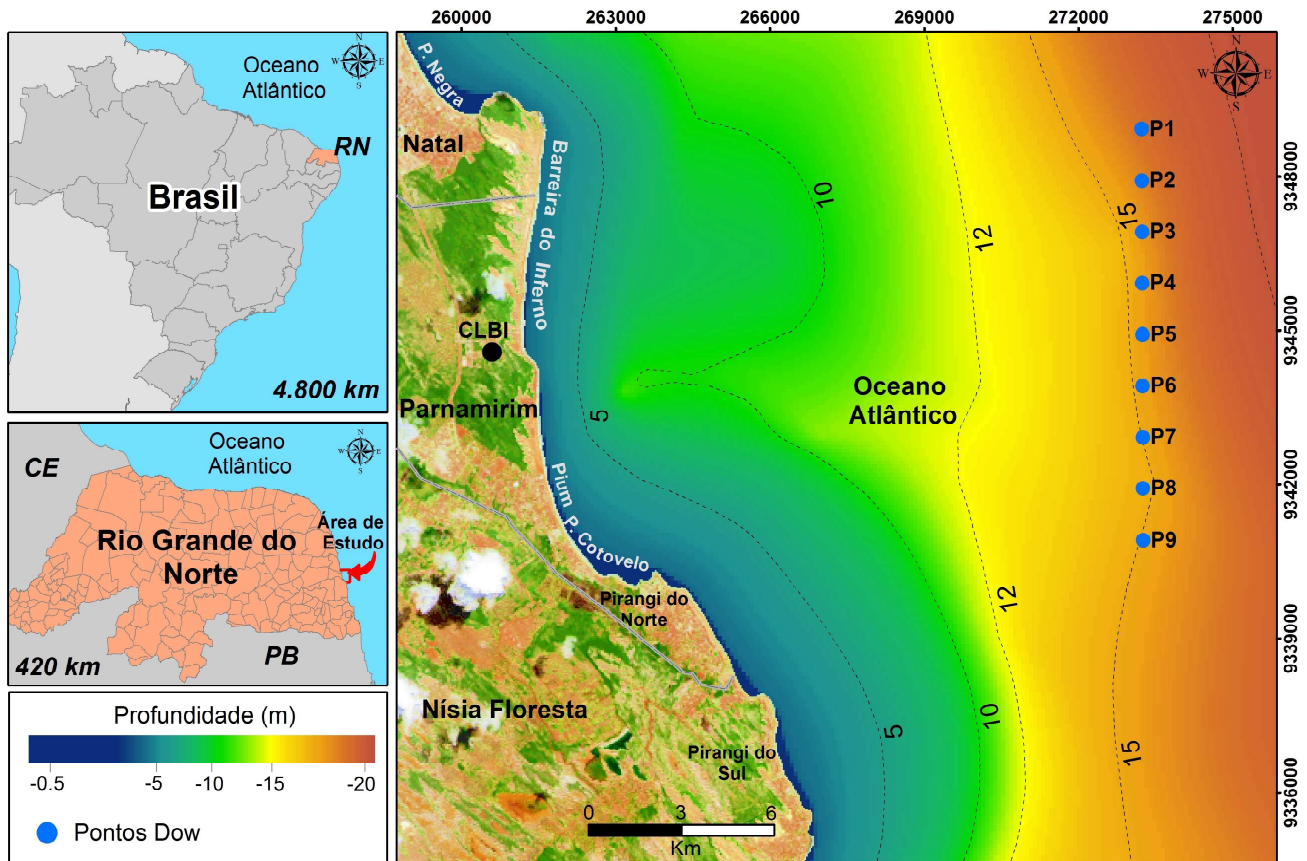


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, no litoral oriental do Rio Grande do Norte (RN), e dos perfis longitudinais empregados na definição da taxa de transporte de sedimentos.

O litoral leste do RN é caracterizado por plataforma continental de 40 km de extensão, medido perpendicularmente à linha de costa, até a isóbata de 100 m que marca a quebra do talude continental. A linha de costa é assinalada pela sequência de baías em forma de anzol ou “zeta”, o que condiciona processos erosivos associados a padrões refrativos e difrativos de ondas (Scudeleri *et al.*, 2016), cujas praias arenosas são relativamente planas e estreitas, variando em média de 10 a 20 m de largura, com presença de linha de recife de arenitos (Amaro *et al.*, 2015). O trecho estudado compreende aproximadamente 12 km de extensão (Figura 1), com cerca de 3 km de falésias ativas da Formação Barreira (Figura 2) e alturas variando entre 95 m na porção

continental e 25 m na da borda externa da falésia. Os taludes possuem inclinações que variam entre 45° e 80° com referencial horizontal (Taquez, 2017).

A circulação oceânica na plataforma oriental do RN é marcada pelo deslocamento para norte da Corrente Norte do Brasil, que se origina da bifurcação da Corrente Sul Equatorial nas proximidades do litoral sul da Bahia, que compõe igualmente a Corrente do Brasil que flui para sul acompanhando o litoral do país (Stramma *et al.*, 2003).

No litoral leste do Nordeste do Brasil, a circulação oceânica, e a convergência do fluxo médio de ar e próximo à superfície vindo do oceano e aquele superficial no sentido da terra para o mar ocasionam um máximo de precipitação no período noturno até o princípio da

manhã (entre 21 h e 9 h local) e máximo diurno (entre 15h e 21h local) em áreas distantes até 300 km da costa (Cavalcanti *et al.*, 2009).

O clima sobre a bacia oceânica atlântica caracteriza-se por sistema anticiclônico de alta pressão atmosférica com máxima de 1.021 mbar no verão nas regiões subtropicais (entre 05°W/32°S) e no inverno movendo-se a 800 km a norte, com centro de 1.025 mbar alocado próximo a 10°W/27°S. No verão, as diferenças na pressão atmosférica aumentam entre os pontos de máximos e as zonas costeiras

da América do Sul e da África, devido às temperaturas relativamente mais baixas sobre as áreas emersas dos continentes, ativando o escoamento atmosférico para oeste nos baixos níveis (Peterson e Stramma, 1991; Reboita *et al.*, 2012). Ainda, o litoral leste do RN está submetido à intensa atuação dos ventos alísios de leste e sudeste (Kayano e Andreoli, 2009), cuja confluência nos baixos níveis está associada à Zona de Convergência Intertropical, além da participação do escoamento derivado dos Anticiclones Subtropicais do Atlântico Sul.

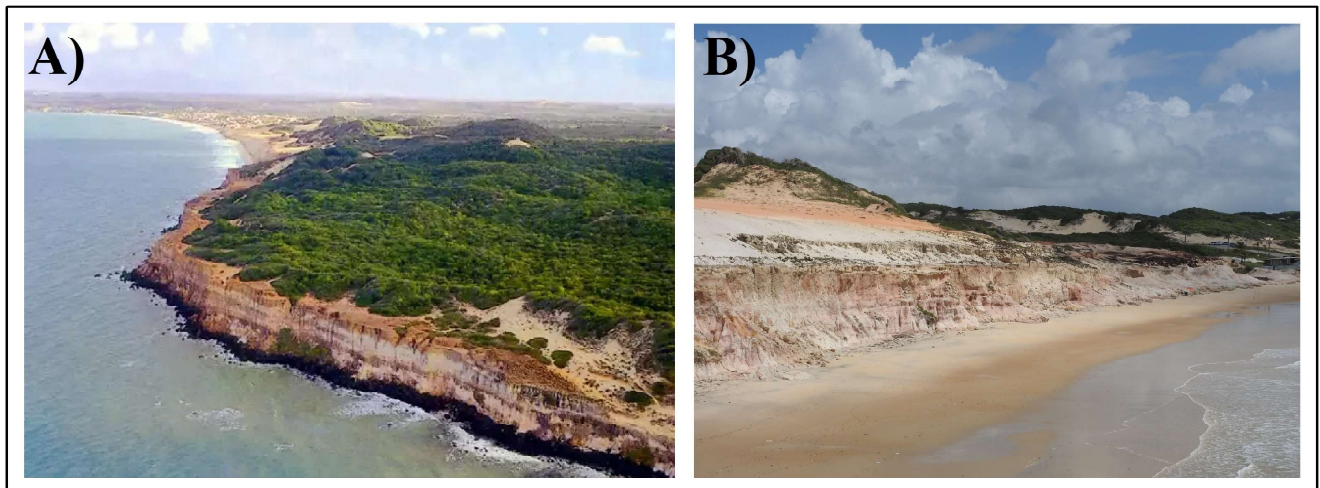


Figura 2 - Panorama da área de estudo com destaque para as falésias da Formação Barreiras em (A) e a praia arenosa frontal à falésia ativa em (B).

3. Materiais e Métodos

A metodologia aplicada neste estudo constou das seguintes etapas: *i*) Compilação de informações secundárias para definir as condições de contorno, alimentação do modelo hidrodinâmico e caracterização da área; *ii*) Métodos de interpolação para avaliar a influência da batimetria na determinação do transporte sedimentar; *iii*) Modelagem numérica dos processos físicos de geração, propagação e transformação do clima de ondas, com a finalidade de caracterizar a hidrodinâmica da área de interesse; *iv*) Estimativa do TLS a partir da aplicação da formulação de Bayram *et al.* (2007).

3.1 Avaliação Geoestatística dos Métodos Interpoladores

As isóbatas nas cartas náuticas, embora sejam de grande importância para a navegação costeira, apresentam baixa resolução espacial para diversos trechos do litoral brasileiro e com as seções transversais e longitudinais descontínuas (Moura *et al.*, 2011). Assim, para

obtenção de superfícies contínuas, imprescindíveis à identificação do gradiente de substrato marinho, valores aproximados devem embutidos para as regiões onde não foram medidos diretamente (Siljeg, 2013), ato efetivado pela aplicação de métodos de interpolação espacial (Collins e Bolstad, 2001; Hartkamp *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2004; Moura *et al.*, 2011). A malha espacial constituída indica os pontos (ou nós) selecionados para a estimativa de valores aproximados aos valores medidos por meio de funções matemáticas (algoritmos), que podem ser semelhantes aos valores iniciais (interpoladores exatos) ou aproximados a esses valores (Bulhões e Drumond, 2012). Para elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) do substrato marinho da área de estudo foram aplicados dois métodos interpoladores geoestatísticos: o Vizinho Natural e a *Krigagem*, cada qual com suas características específicas de representação de dados.

Os dados batimétricos foram digitalizados no *software* ArcGis 10.3 a partir da Carta Náutica n°22100

(CN-22100) propiciada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil, no ano de 2015, georreferenciada com base no *Datum WGS1984* e nas coordenadas *UTM Zona 25-Sul*. Após a definição de espaçamento malha batimétrica, com as isóbatas ajustadas ao nível médio do mar, aplicou-se os mode-

los de interpoladores (*Vizinho Natural* e *Krigagem*) no *software Surfer 11*, conforme apresentado na tabela 1. Tais isóbatas interpoladas serviram à simulação de todos os casos de propagação de ondas, correntes e transporte longitudinal de sedimentos e na comparação entre os resultados.

Tabela 1: Domínio espacial definidos para a interpolação dos dados batimétricos da Carta Náutica nº22100.

$x_{inicial}/y_{inicial}$	x_{final}/y_{final}	Dimensão da Malha (m)	Resolução (x,y)
266539/9332631	275944/9352317	100x100	467,423

3.2 Modelagem Numérica de Propagação de Ondas

Para determinar o regime de ondas, necessários para a estimação e caracterização da potencial taxa de TLS foi empregado o pacote computacional *SMC-Brasil* (MMA, 2018). O *SMC-Brasil* possibilita o emprego de ferramentas de análise do clima de ondas em zonas profundas, intermediárias e rasas, demarcadas pela relação entre a profundidade e a interação do tipo de leito (rugosidade) com a propagação de ondas. Os parâmetros de onda característicos de zonas com profundidades intermediárias são indispensáveis na efetivação de modelagem hidrodinâmica para compreensão dos efeitos das forçantes marinhas incidentes diretamente na linha de costa.

Os parâmetros de onda em profundidades intermediárias são derivados da série de dados de ondas em águas profundas denominada *Global Ocean Waves* (*GOW*), adquiridas por meio de métodos numéricos de reanálise para propagação até a costa (Reguero et al., 2012). Para a área de estudo foram selecionados 9 pontos (Figura 1) distantes aproximadamente 12 km da linha de costa, com espaçamento de 1 km entre os pontos e profundidades variando entre 15 e 16 m. A partir da aplicação da técnica de propagação até a costa (*downscaling*), por meio do modelo numérico de propagação de ondas *Simulating WAVes Nearshore* (*SWAN*, Booij et al., 1999), as informações de ondas com características globais são transferidas para zonas de profundidades intermediárias. Tal série de ondas, denominada *Downscaling Ocean Waves* (*DOW*, Camus et al., 2013), compõe a base de dados do *SMC-Brasil*. As informações se referem aos parâmetros altura de onda significativa (*Hs*), período de pico (*Tp*) e direção média (θ_m), que abrangem todo o litoral brasileiro.

O *SMC-Brasil* dispõe de base de dados batimétricos que possibilitam estabelecer o modelo digital do terreno de qualquer região da costa brasileira, essências na representação adequada da morfologia costeira e na obtenção de resultados confiáveis na análise de fenômenos hidrodinâmicos. Dessa forma, foi agregada ao estudo a digitalização das isóbatas presentes na Carta Náutica nº810 (CN-810) àquelas da CN-22100, em escala 1: 50.000. As profundidades são referidas ao nível de baixamar média de sizígia ou Nível de Redução (NR), equivalente a 1,3 m. A resultante foi a interpolação disposta no *SMC-Brasil* integradas às isóbatas originadas nas duas cartas náuticas CN-810 e CN-22100 (Figura 1).

Como parâmetros de entrada no *SMC-Brasil* tem-se: a altura significativa média (*Hs*50%); o período de pico médio (*Tp*50%); a altura significativa para situações de tempestade (*Hs*₁₂), que significa a altura de onda significativa superada apenas 12 horas por ano; o período de pico para situações de tempestade (*Tp*12), que é o período de pico associado as alturas de onda *Hs*₁₂. O espectro direcional de ondas é definido pela função de dispersão direcional dada pela formulação de Borgman (1984) que determina a direção média das ondas θ e a largura do espectro σ , ambas dadas em graus, como dados de entrada retratada na equação 1:

$$G(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left\{ \exp \left[\frac{-(j\sigma_m)^2}{2} \right] \cos j(\theta - \theta_m) \right\} \quad \text{Equação (1)}$$

Para a faixa litorânea da Barreira do Inferno propagueu-se 8 casos em condições de regime médio e extremo para as duas direções de ondas predominantes, Leste (E) e Leste-Sudeste (ESE), tanto em situações de baixamar quanto em situações de preamar, como mostra a Figura 3.

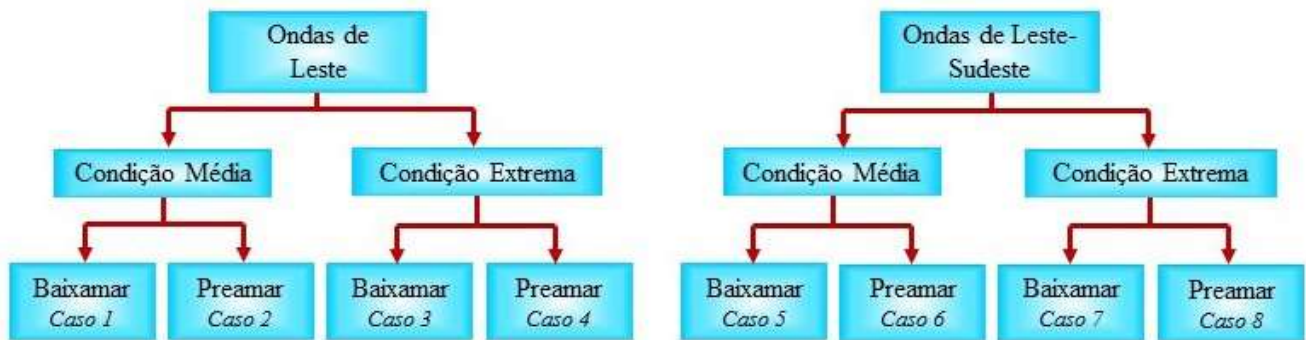


Figura 3 - Fluxograma dos casos propagados em condições específicas de estado de mar.

A Tabela 2 exibe uma síntese dos parâmetros de ondas usados como limites na entrada de dados para a modelagem hidrodinâmica, de acordo com os valores adotados por Araújo *et al.* (2015). Para cada um dos casos propagados foi definida a altura de maré máxima em 2,6 m, conforme a indicação registrada nas tábuas de maré para a maior altura de maré ocorrente na região próxima do porto de Natal, em preamares de sizígia.

O parâmetro γ é o indicador de alargamento de pico, que delinea a dispersão da energia das ondas pelas frequências próximas ao pico no espectro tipo

JONSWAP. Quando a energia do espectro está concentrada no torno de um período de pico, prevalecem os casos de ondulações do tipo *swell*. Já nos casos em que os espectros de energia estão dispersos, prevalecem as ondulações do tipo *sea*. O parâmetro σ representa a dispersão direcional em torno da direção média. Neste trabalho foram acatadas que ondulações do tipo *sea* ocorrem nos casos em que $4 \text{ s} \leq T_p \leq 10 \text{ s}$, sendo adotados $\gamma = 3,3$ e $\sigma = 20^\circ$; enquanto que ondulações do tipo *swell* acontecem nos casos em que $T_p \geq 10 \text{ s}$, sendo adotados $\gamma = 8$ e $\sigma = 15$.

Tabela 2: Síntese dos parâmetros de ondas utilizadas como fronteira de entrada das propagações da modelagem hidrodinâmica.

	Direção	Hs ₁₂ (m)	Hs50% (m)	Tp ₁₂ (s)	Tp50% (s)	γ	σ (graus)	Maré (m)
Caso 1	E	--	1,38	--	7,58	3,3	20	0,0
Caso 2	E	--	1,38	--	7,58	3,3	20	2,6
Caso 3	E	2,39	--	12,4	--	8,0	15	0,0
Caso 4	E	2,39	--	12,4	--	8,0	15	2,6
Caso 5	ESE	--	1,46	--	7,41	3,3	20	0,0
Caso 6	ESE	--	1,46	--	7,41	3,3	20	2,6
Caso 7	ESE	2,39	--	11,33	--	8,0	15	0,0
Caso 8	ESE	2,39	--	11,33	--	8,0	15	2,6

3.3 Determinação do Transporte Longitudinal de Sedimentos (TLS)

Para o cálculo da TLS foram estabelecidos cinco perfis na faixa litorânea frontal às falésias da Barreira do Inferno (Figura 4), tendo-se como base a isóbata de 5 m como o valor médio da profundidade de fechamento descrita por Araújo *et al.* (2015) na equação de Harllermeier (1983) para a praia de Ponta Negra, na

vizinhança norte da área de estudo.

Um dos parâmetros iniciais para o cálculo do TLS é o diâmetro médio dos grãos de areia, em que se preferiu a aplicação do modelo de perfil de equilíbrio proposto por Bruun (1954) e Dean (1977), devido a inexistência de estudos de caracterização sedimentológica específicos para a praia da Barreira do Inferno.

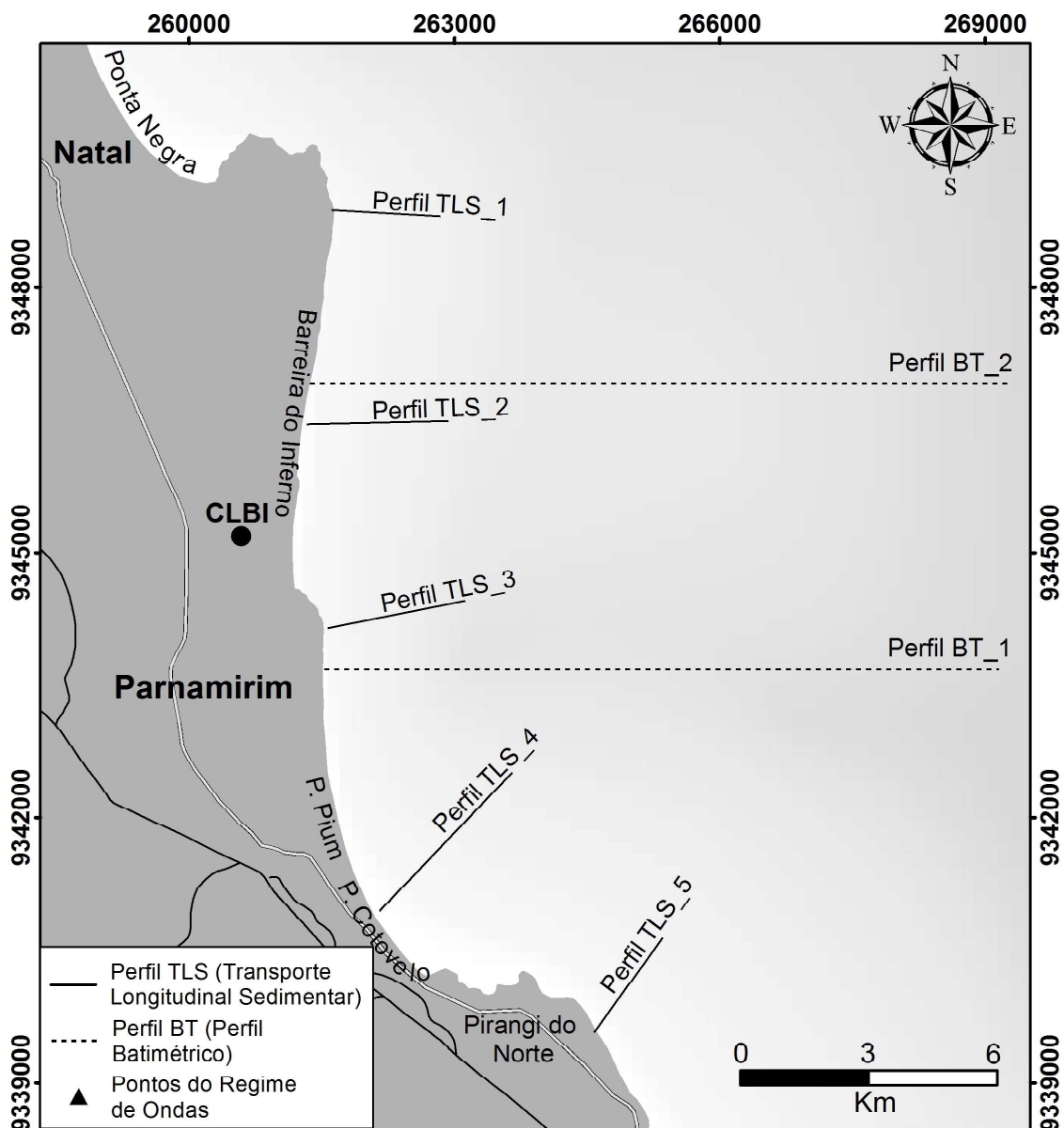


Figura 4 - Localização dos perfis batimétricos transversais e dos perfis de transporte longitudinal de sedimentos (TLS).

3.1.2 Formulação de Bayram

Para Araújo *et al.* (2015), a disposição de sedimentos em suspensão devido à ação das ondas é considerada o principal meio de transporte na zona de arrebentação, considerando a equação de Bayram *et al.* (2007). Para a manutenção de determinada concentração $c(x,z)$ de sedimentos em suspensão, o trabalho (W) necessário é dado pelo produto da variável concentração e o peso das partículas submersas, com a velocidade de queda (w_s), como mostra a equação 2.

$$W = \int_0^{x_b} \int_{-h(x)}^0 c(x, z) (p_s - p) g w_s dz dx \quad \text{Equação (2)}$$

onde, x é a coordenada transversal, com origem na linha de costa e referenciada positivamente em direção ao mar; z é a coordenada vertical, com origem no nível médio da água em repouso; e , h é a profundidade. Considerando-se que apenas parte do fluxo de energia de onda (F) é aproveitado para a realização de trabalho e que a taxa de TLS total (Q_{lst}) pode ser representada pelo produto da concentração de sedimentos com a velocidade de corrente longitudinal (V), tem-se a equação 3.

$$Q_{lst} = \int_0^{x_b} \int_{-h(x)}^0 c(x, z) V(x, z) dz dx \quad \text{Equação (3)}$$

Assim, a equação 4 configura a formulação de Bayram *et al.* (2007) para a obtenção da taxa de TLS total (Q_{lst}), após considerar como constante a velocidade de corrente longitudinal:

$$Q_{lst} = \frac{\epsilon}{(p_s - p)(1 - p)g w_s} F \hat{V} \quad \text{Equação (4)}$$

onde \hat{V} é a velocidade longitudinal de corrente média; ρ a porosidade do sedimento; ϵ , ϵ é o coeficiente de transporte, valor adimensional que expressa a eficiência das ondas em manter o sedimento suspenso para calibração do modelo, como definido por Mil-Homens *et al.* (2013). A equação 5 trata da definição de ϵ .

$$\epsilon = \left[7.682 \times 10^5 \left(\frac{H_s}{L_o} \right)^{1.283} + 1672.2 \right]^{-1} \quad \text{Equação (5)}$$

onde H_s é a altura significativa de onda e L_o é o comprimento de onda.

4. Resultados e Discussões

4.1 Análise Geoestatística do Método Interpolador

As isóbatas das cartas náuticas foram submetidos à avaliação estatística quanto aos valores alcançados com os interpoladores, de acordo com os métodos estatísticos de medidas de erro do coeficiente de determinação (R^2) e da adoção do índice de concordância (d), definido por Willmot *et al.* (1985) e que reflete em valor adimensional (de 0 a 1), onde haveria maior concordância entre os valores da carta náutica e os interpolados quando esse valor se aproxima de 1.

A Tabela 3 apresenta o resultado o coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância (d) nos dois modelos de interpoladores, *Krigagem* e *Vizinho Natural*, que indicaram altas correlações e concordância.

Tabela 3: Estatística das discrepâncias das isóbatas obtidas da carta náutica em relação aos dados resultantes dos dois métodos de interpoladores *Krigagem* e *Vizinho Natural*.

	<i>Krigagem</i>	<i>Vizinho Natural</i>
R^2	0,996	0,997
d	0,989	0,998

A análise visual comparativa entre os perfis transversais extraídos dos MDE oriundos das interpolações permitiu averiguar a regularidade das superfícies nos setores entre as isóbatas, como exhibe a Figura 3. Na morfologia do Perfil 1, localizado em frente à falésia da Barreira do Inferno (Figura 5), destaca-se a superfície regular e análoga para ambos os métodos de interpoladores até a isóbata de 10 m. A partir desta isóbata, ocorre diferença média de -0,378 m entre isóbatas semelhantes, comparados os dois modelos, ou seja, nota-se que o método *Vizinho Natural* alcançou gradientes suaves, enquanto o método da *Krigagem* produziu condições de maior alisamento das feições de fundo marinho. O modelo de ajuste linear evidencia excelente correlação alcançando o valor do coeficiente de determinação R^2 com valor de 0,99; assim, o modelo explica precisamente a variância dos dados a partir da isóbata de 10 m.

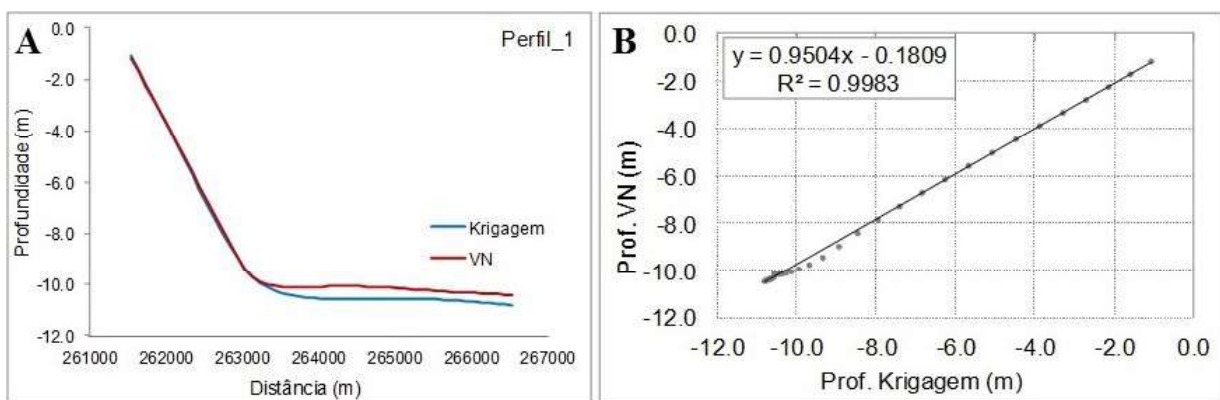


Figura 5 - Comparação entre gradientes batimétricos e o modelo de ajuste linear extraídos do Perfil 1 nos MDE gerados pelos interpoladores *Vizinho Natural* e *Krigagem*.

Seguindo o mesmo procedimento, a Figura 6 exibe o Perfil 2 situado também na faixa praial no limite da Barreira do Inferno. Novamente, verifica-se o excelente ajuste linear dos modelos com R^2 igual a 0,98. Os MDE gerados ilustram a tendência de aumento da variância a partir da profundidade de 10 m. Apesar de, estatisti-

camente, o ajuste linear ser aceitável, ocorre excelente correlação nas profundidades rasas até a isóbata de 8 m, como indica a Figura 6A. Contudo, a partir desta isóbata, ocorre uma tendência de dispersão dos dados batimétricos para ambos os métodos de interpolação, Vizinho Natural e *Krigagem* (Figura 6B)

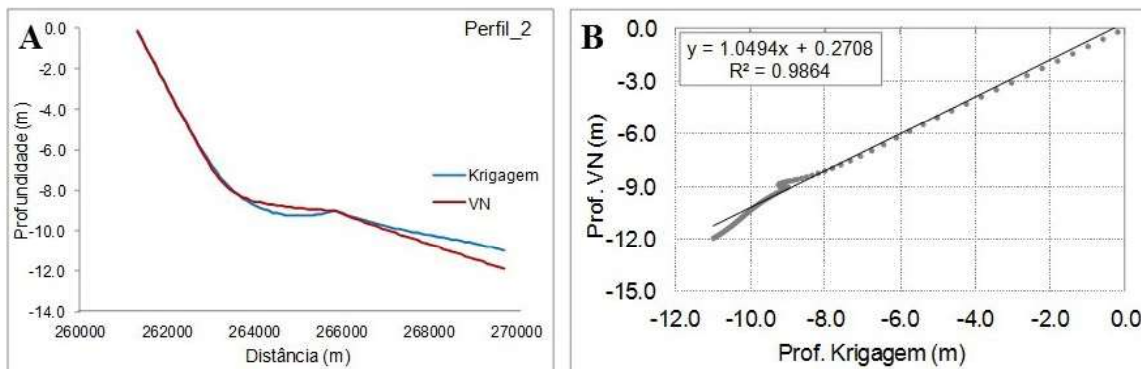


Figura 6 - Comparação entre gradientes batimétricos e modelo de ajuste linear extraídos dos Perfil 2 nos MDE gerados pelos interpoladores Vizinho Natural e *Krigagem*.

4.2 Regime das Ondas Associadas às Condições Extremas

A análise de pontos DOW permitiu a caracterização do clima de ondas de profundidade distribuídos na faixa litorânea frontal à Barreira do Inferno, sendo selecionado apenas um dos pontos como o mais representativo das condições de agitação marinha (Figura 1). A seleção desse ponto DOW derivou de abordagem comparativa entre 9 pontos DOW originais (Figura 7) baseada em análises

estatísticas de histogramas e regressões lineares. Entre os parâmetros de onda empregados nesta abordagem foram aplicadas às alturas significativas de onda e as direções de incidência (Figura 8). Portanto, em resumo, os critérios adotados consideraram: (i) as análises comparativas de estatísticas descritivas dos parâmetros de onda de todos os 9 pontos DOW; (ii) a distância e a localização em relação à área específica de interesse; (iii) a isóbata com profundidades superiores a 15 m.

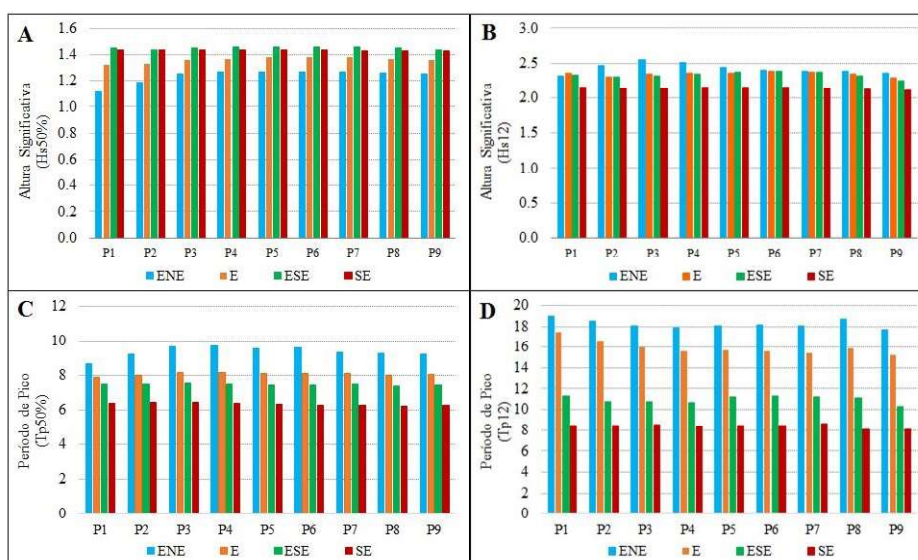


Figura 7 - Caracterização do clima de ondas na faixa litorânea da Barreira do Inferno por direção de incidência: A) Altura significativa em condições médias (Hs50%); B) Altura significativa das ondas em condições extremas (Hs12); C) Período de pico das ondas em condições médias (Tp50%); e, D) Período de pico das ondas em condições extremas (Tp12).

A análise da probabilidade de incidência das ondas permitiu identificar a predominância de ondas incidentes de Leste (E) e Leste-Sudeste (ESE) para a área de estudo. A relação entre alturas significativas e os períodos de picos de ondas por direção de incidência (Figura 7) evidencia que o ponto P6 exibe valores análogos à média aritmética geral, como constatado pelos altos coeficientes de correlação por regressão linear apresentados na Figura 8.

Logo, de acordo com as análises geoestatísticas,

foi selecionado o ponto P6 como aquele representativo do clima de ondas ao largo da faixa litorânea da Barreira do Inferno e o melhor preconizado para a propagação de ondas até a linha de costa (Tabela 4). Portanto, o clima de ondas da faixa litorânea da Barreira do Inferno foi estabelecido pela média ponderada pelas probabilidades de ocorrência dos períodos de pico e alturas significativas de ondas, fornidos pelo ponto P6, em cada direção principal (E, ESE).

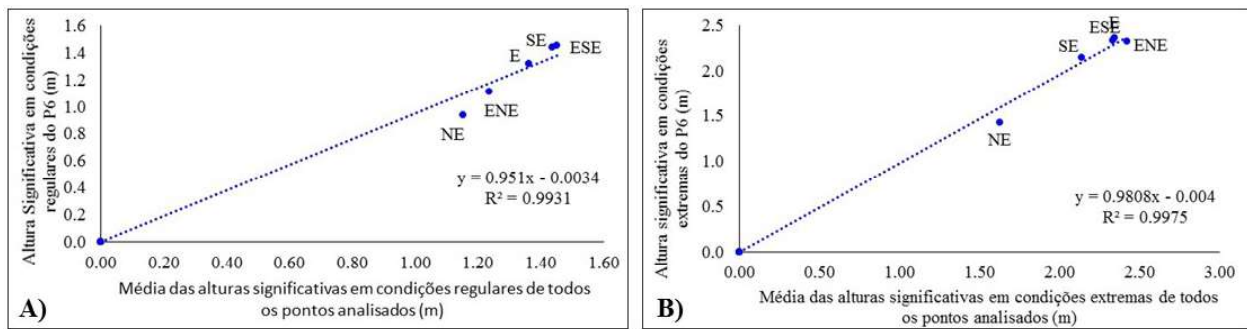


Figura 8 - Relação entre a altura significativa em condições regulares e extremas no ponto P6 comparados à média e aos extremos das alturas significativas de todos os pontos avaliados.

Tabela 4: Frequência de ocorrência do clima de ondas com base na probabilidade de cada direção principal, altura significativa e período de picos médios obtidos no ponto P6.

Orientação	Probabilidade de Direção (°)	Hs ₁₂ (m)	Hs50% (m)	Tp ₁₂ (s)	Tp50% (s)
E	0,24	2,39	1,38	15,64	8,08
ESE	0,73	2,39	1,46	11,33	7,41
Média Ponderada	-----	2,39	1,44	12,40	7,58

A Figura 9 exibe os resultados de avaliações dos parâmetros de alturas de onda significativa (Hs) e período de pico (Tp) assinalando o clima de ondas no ponto P6 sob condições extremas. Para os parâmetros de ondas, os valores extremos podem ser ajustados por meio de três distribuições, Gumbel, Fréchet e Weibull, como estabelece o teorema das três filas (Fisher e Tippett, 1928). Os três tipos de distribuições podem ser combinados em uma única expressão denominada distribuição de valores extremos generalizados (GEV) dada pela equação 6:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\psi} \right)^{1/\xi} \right] \quad \text{Equação (6)}$$

onde μ é o parâmetro de localização; ψ significa o parâmetro de escala; ξ é o parâmetro de forma. Assim, com base na equação 6: para $-0,05 < -\xi < 0,05$ a distribuição

resultante é a de Gumbel; para $\xi > 0,05$ a distribuição resultante é a de Fréchet; e, para $\xi < -0,05$ a distribuição resultante é a de Weibull.

Desse modo, os dados indicam que a distribuição de Weibull foi aquela com melhor ajuste para a faixa litorânea da Barreira do Inferno. Portanto, averiguou-se que a altura de onda significativa do P6 é de 2,5 m para o período de retorno de 10 anos. O período de pico (Tp) varia entre 4 s e 14 s, onde períodos de pico inferiores a 8,29 s ocorrem em cerca de 75% dos estados de mar. A análise de extremos GEV indica que o período de pico é de aproximadamente 13 s, para o período de retorno de 10 anos.

As correlações entre a Hs, o Tp e a direção, examinada na distribuição conjunta Hs-Dir e Hs-Tp, indicam que as ondas mais frequentes no ponto P6 são aquelas com Hs entre 1,4 e 1,5 m (Figura 9), com período de pico de 7,5 s e para direção de ondas provenientes de 110° (Figura 10).

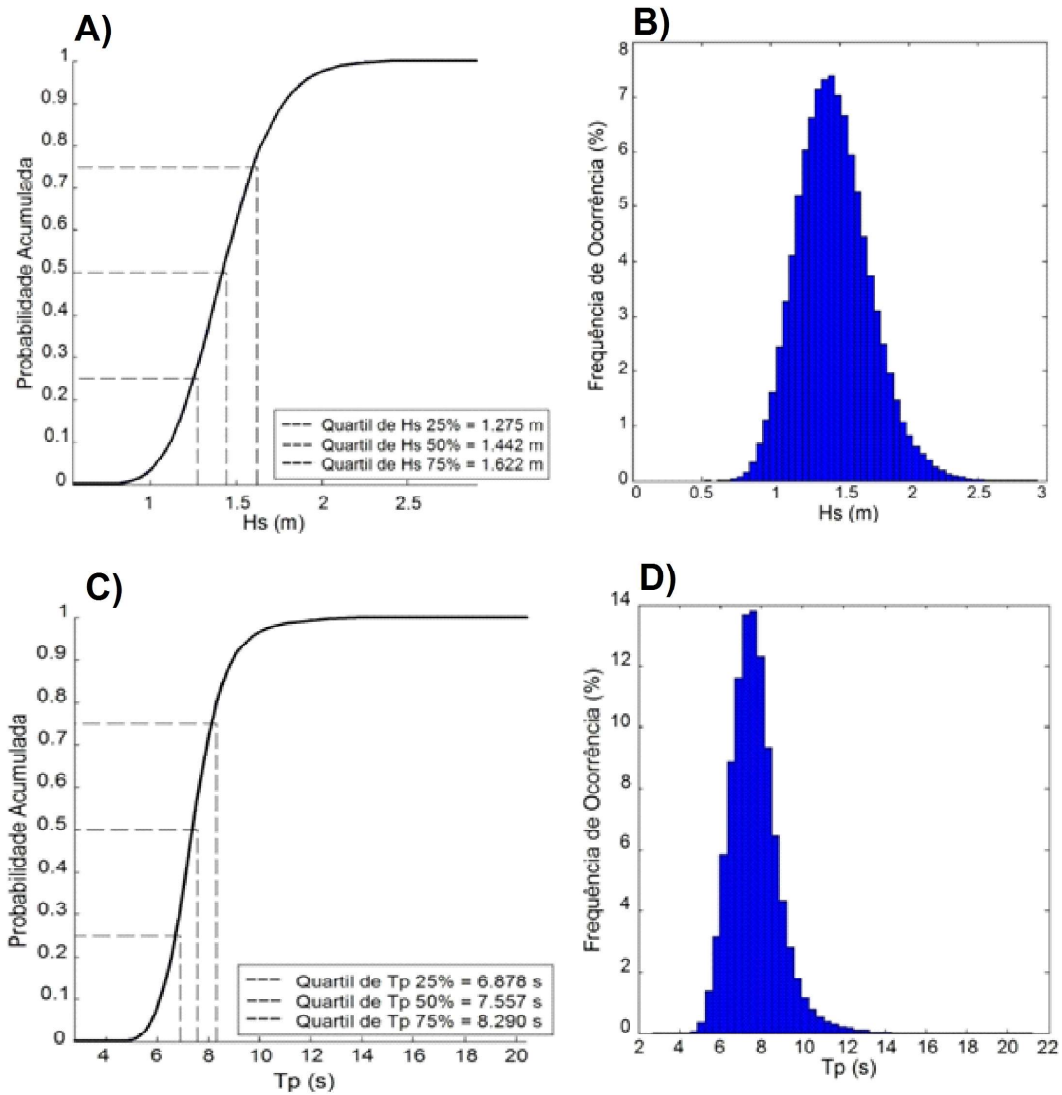


Figura 9 - Características de alturas de ondas significativas (H_s), de período de pico (T_p) no ponto P6. A) Função de distribuição de H_s ; B) Histograma de H_s ; C) Função de distribuição de T_p ; e, D) Histograma de T_p .

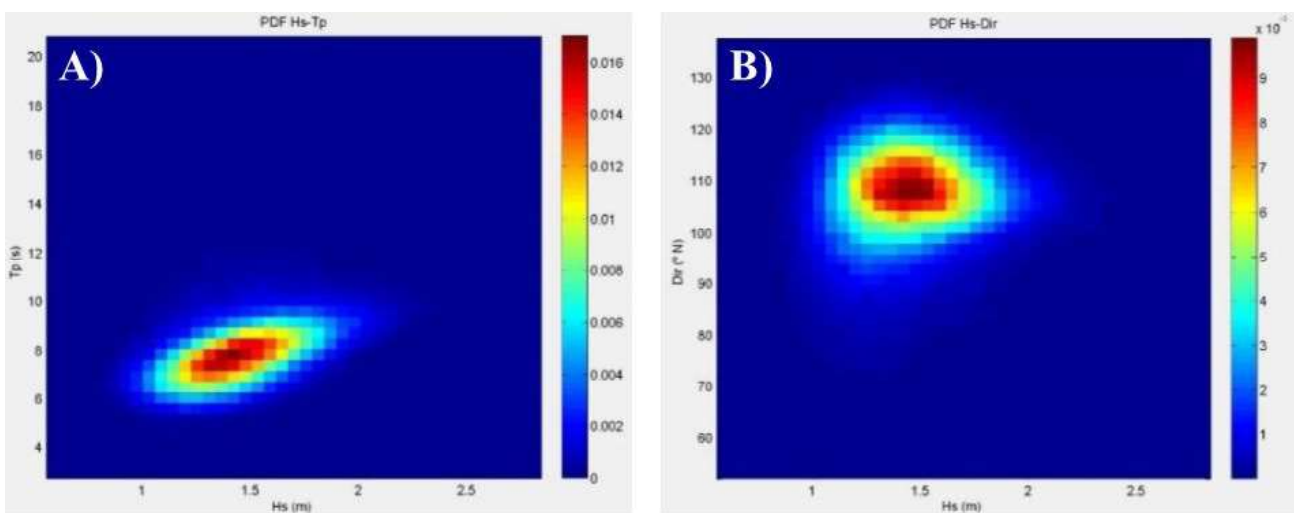


Figura 10 - Distribuição integrada dos parâmetros de ondas: A) H_s - T_p ; B) H_s -Direção.

4.3 Comparação dos eventos de correntes entre os valores numéricos: Vizinho Natural e Krigagem

Na faixa litorânea da Barreira do Inferno todos os casos simulados mostraram a predominância de correntes longitudinais no sentido S-N, embora o trecho ao sul do afloramento das falésias mostre correntes com menor magnitude de sentido N-S, acompanhando toda a extensão da linha de costa.

As correntes de maior magnitude se concentraram no sul da praia, como também indicam as ocorrências de cúspides praias. No limite entre a praia frontal às falésias da Barreira do Inferno e a praia vizinha de Ponta Negra (limite norte) possui um registro de aumento de velocidade das correntes. Nesta região é assinalada a ocorrência de arenitos de praia (*beachrocks*), que não estão demarcados na morfologia das isóbatas apresentadas na CN-22100. Deste modo, apesar do conhecimento local que esta faixa litorânea possui menores profundidades, ainda não se assegura que as correntes ganham velocidade significativas, em decorrência da grande quantidade de arenitos de praia que reduzem a energia do escoamento.

Em todos os casos analisados foi indicado que as correntes têm ponto de convergência no setor sul da praia da Barreira do Inferno, que promovem intensa ação erosiva

nesse setor das falésias sedimentares. Tal fato, corrobora com o conceito de desenvolvimento a longo prazo de praias com forma em anzol ou “zeta”. Portanto, nesse setor sul da praia, as características de menor profundidade batimétrica, de maior participação hidrodinâmica do substrato marinho, a maior ocorrência de sedimentos em suspensão, atrelada à ocorrência de correntes convergentes, robustecem a hipótese de que a erosão é o processo sedimentar predominante nessa região.

Quanto as diferenças apresentadas entre os métodos interpoladores empregados na definição do MDE da faixa litorânea (Figura 11 e 12), as velocidades obtidas através da *Krigagem* mostraram maior magnitude, alcançando até 0,27 m/s na região sul da praia. Já o método Vizinho Natural apresentou valores de até 0,18 m/s para a mesma região. Tal fato pode ser pertinente à melhor identificação pelo método da *Krigagem* de algumas feições morfológicas praias existentes na área de estudo, como pelo fato de que esse método de interpolação mostrou uma batimetria ligeiramente mais rasa que aquela advinda do Vizinho Natural. Assim, também de acordo com a análise da propagação de ondas, surge outro indicativo de que o método da *Krigagem* pode ter potencial para representar valores mais expressivos na análise do TLS.

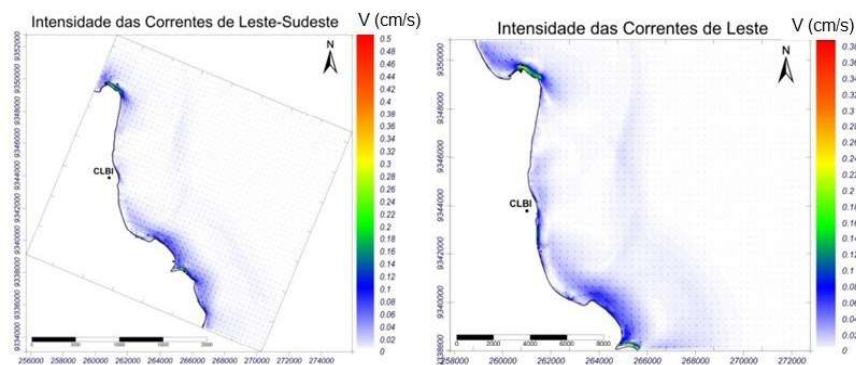


Figura 11 - Magnitude de eventos extremos de correntes costeiras: Leste (E) e Leste-Sudeste (E-SE), utilizando a batimetria obtida pelo método interpolador Vizinho Natural.

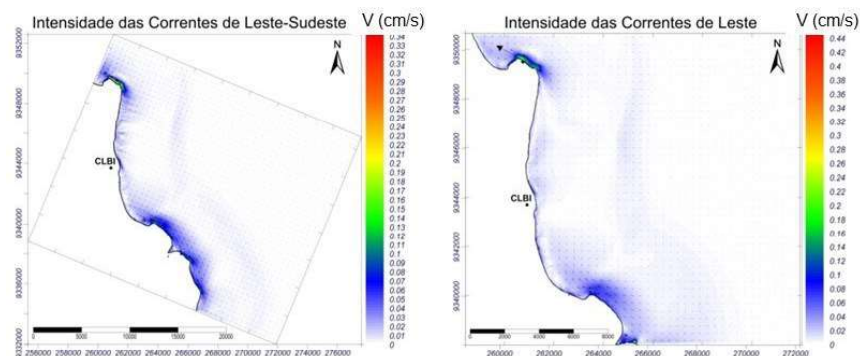


Figura 12 - Magnitude de eventos extremos de correntes costeiras: Leste (E) e Leste-Sudeste (E-SE), utilizando a batimetria obtida pelo método interpolador Krigagem.

4.4 Fluxo Médio de Energia Anual dos Sedimentos

Com base na metodologia delineada para a estimativa do potencial médio de TLS anual e sazonal, nesta seção foram apresentados os resultados de cada método de interpolação. No SMC-Brasil foram elaborados os mapas com os valores para a taxa de TLS médio anual, igualmente para os períodos chuvosos e secos, considerando-se a série histórica disponível de 60 anos, entre os anos de 1948 a 2008. Para cada perfil foram avaliadas a evolução do transporte anual no decorrer dessa série histórica.

Destaca-se que no SMC-Brasil utilizou-se o ajuste adotado por Dean e Dalrymple (2004) na diferenciação de ambos os sentidos de transporte ao longo da faixa litorânea da Barreira do Inferno. Considerando-se o observador mirando o mar, o transporte litorâneo assume valor positivo quando o sedimento é transportado para a sua direita e negativo quando

o transporte se dá para a sua esquerda. Assim, para a área de estudo os valores negativos representam o volume de sedimentos transportado para norte e os positivos simulam o volume de sedimentos transportado para sul.

A Figura 13 exhibe os valores de fluxo médio de energia (J/m.s). Nesse caso, o Perfil 1 mostrou o maior fluxo médio de energia anual de 3.318,08 J/m.s (no método interpolador Vizinho Natural) e 3.331,21 J/m.s (no método interpolador *Krigagem*). Tais valores, quando comparados ao valor de 8.000 J/m.s encontrado por Araújo *et al.* (2015) para a praia de Ponta Negra, mostram-se inferiores em ambos os métodos de interpoladores empregados. Entretanto, a praia de Ponta Negra é urbana e densamente ocupada, enquanto a praia da Barreira do Inferno é totalmente desprovida de qualquer infraestrutura ou atividade urbana.

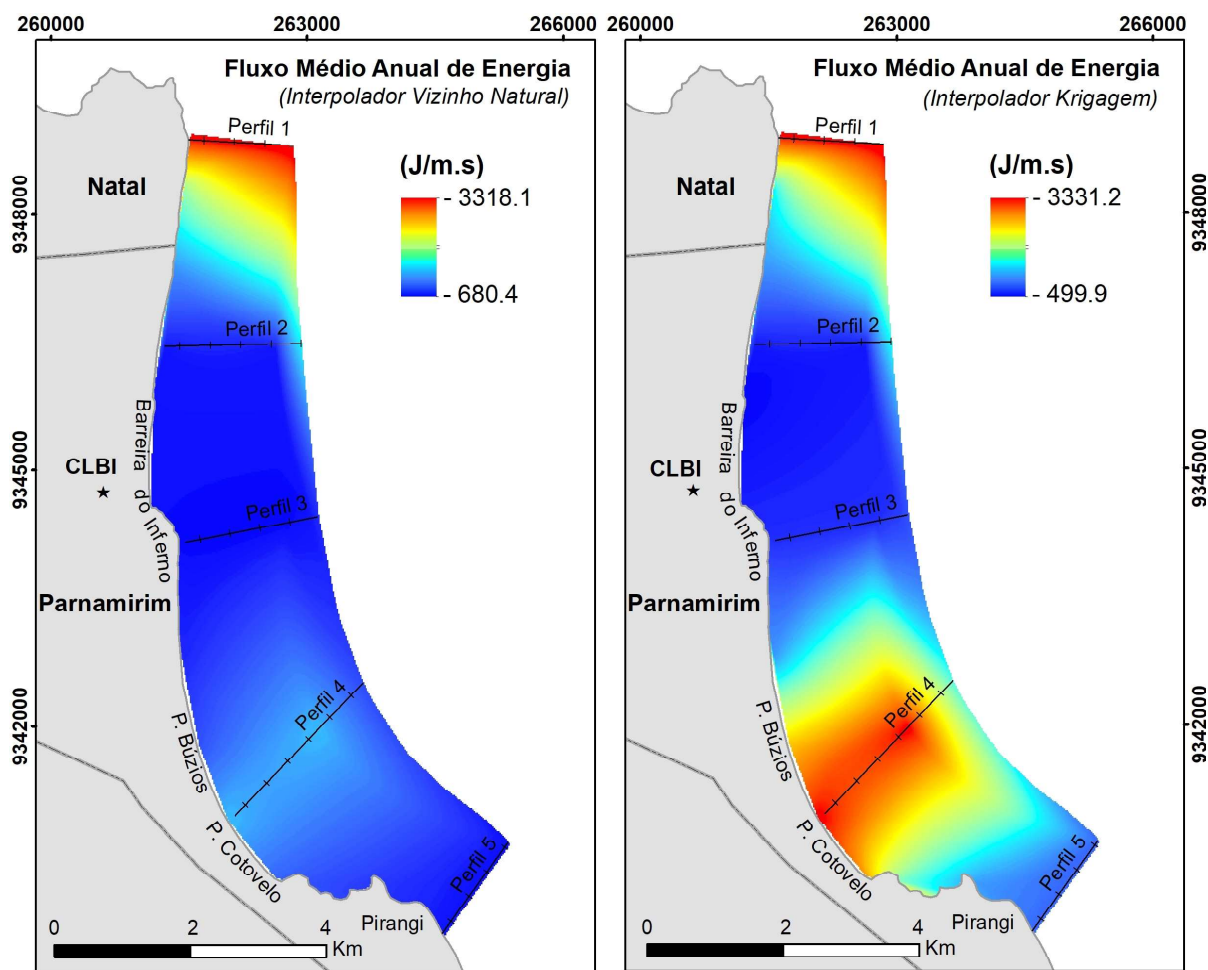


Figura 13 - Comparação do fluxo médio anual de energia para os casos obtidos nos métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

4.5 Transporte Médio Anual de Sedimentos

O TLS médio anual subdividido nas parcelas negativas e positivas, para os dois métodos interpoladores utilizadas (Vizinho Natural e *Krigagem*), é apresentado na Figura 14. Nota-se o domínio de TLS negativo no sentido

S-N nos dois métodos de interpoladores empregados. O Perfil 1 apresentou os maiores valores em ambos os métodos de interpoladores, reduzindo expressivamente nos perfis 2, 3 e 4, mas retornando a valores acima de 80.000 m³/ano no Perfil 5 para o método de interpolação por *Krigagem*.

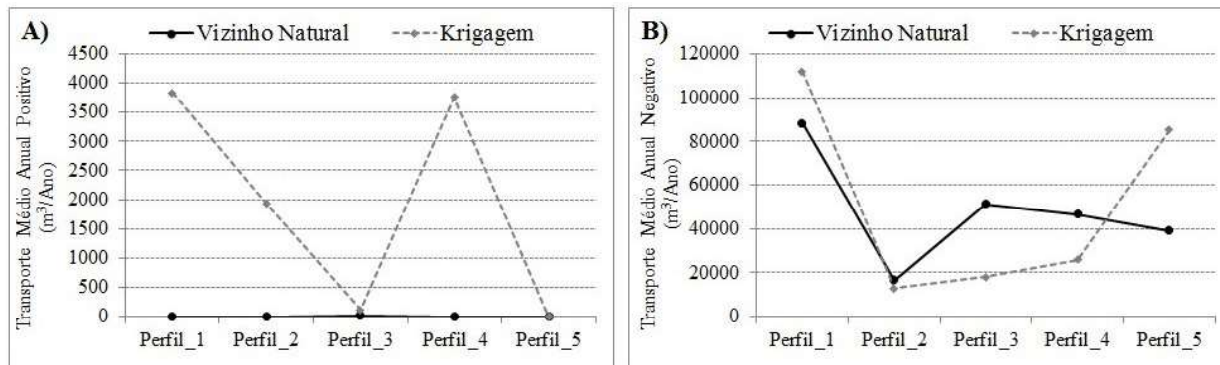


Figura 14 - Transporte médio anual de sedimentos (positivo ou negativo) obtidos a partir dos métodos de interpoladores Vizinho Natural e *Krigagem* para cada perfil na faixa litorânea da Barreira do Inferno.

4.6 Transporte Médio Sazonal de Sedimentos

Verão

Nas análises do transporte médio sazonal de verão ou seco (meses de dezembro, janeiro e fevereiro), período considerado seco, o método de interpolação por *Krigagem*, comparado ao método Vizinho Natural, exibiu os maiores valores de fluxo médio de energia em todos os perfis, especialmente nos perfis 1 e 4 que alcançaram, respectivamente, 2911,88 J/m.s e 2372,66 J/m.s. No método Vizinho Natural, o Perfil 1 registrou valor máximo de 1872,19 J/m.s e o Perfil 4 valor de 701,71 J/m.s, valores inferiores aos obtidos no método de interpolação por *Krigagem* (Figura 15).

O Perfil 4, frontal à praia de Cotovelo, geralmente visitada para a prática de surfe, mostra forte mobilidade de sedimentos, característico de ambiente mais energético, quando comparado aos perfis 2 e 3 que correspondem às áreas totalmente protegidas. Tal fato para este trecho é confirmado pelas velocidades, obtidas no método de interpolação por *Krigagem*, que alcançaram as maiores magnitude de até 0,27 m/s.

A Figura 16 evidencia que as taxas positivas e negativas para os meses de verão. Como descrito anteriormente, as taxas médias de TLS, tanto para os valores positivos quanto para os negativos, fo-

ram superiores quando interpolados pelo método da *Krigagem* em relação ao Vizinho Natural, com destaque para a taxa negativa no sentido S-N de 19.365,37 m³/ano e 16.796,96 m³/ano nos perfis 1 e 5, respectivamente.

O balanço total de verão confirma as maiores taxas obtidas pelo método de interpolação da *Krigagem*, com média foi de 7.748,7 m³/ano, ou seja, 1.869,7 m³/ano de taxa maiores que o os valores obtidos pelo método de interpolação do Vizinho Natural (Figura 17).

Inverno

Nas análises do transporte médio sazonal de inverno ou chuvoso (meses de junho, julho e agosto), o os maiores valores para o fluxo médio de energia no Perfil 1 ocorreu no método interpolador Vizinho Natural. No inverno, meses onde se registram as maiores ocorrências de chuva e ventos fortes, o Perfil 1 apresentou 4.576,75 J/m.s (pelo método interpolador Vizinho Natural), como mostra a Figura 18. No Perfil 4 ocorreu o maior fluxo médio de energia, 4.080,89 J/m.s para o método interpolador *Krigagem*. Contudo, destaca-se que o Perfil 1 mostrou o segundo maior valor de fluxo médio de energia, 3.705,07 J/m.s no método interpolador *Krigagem*.

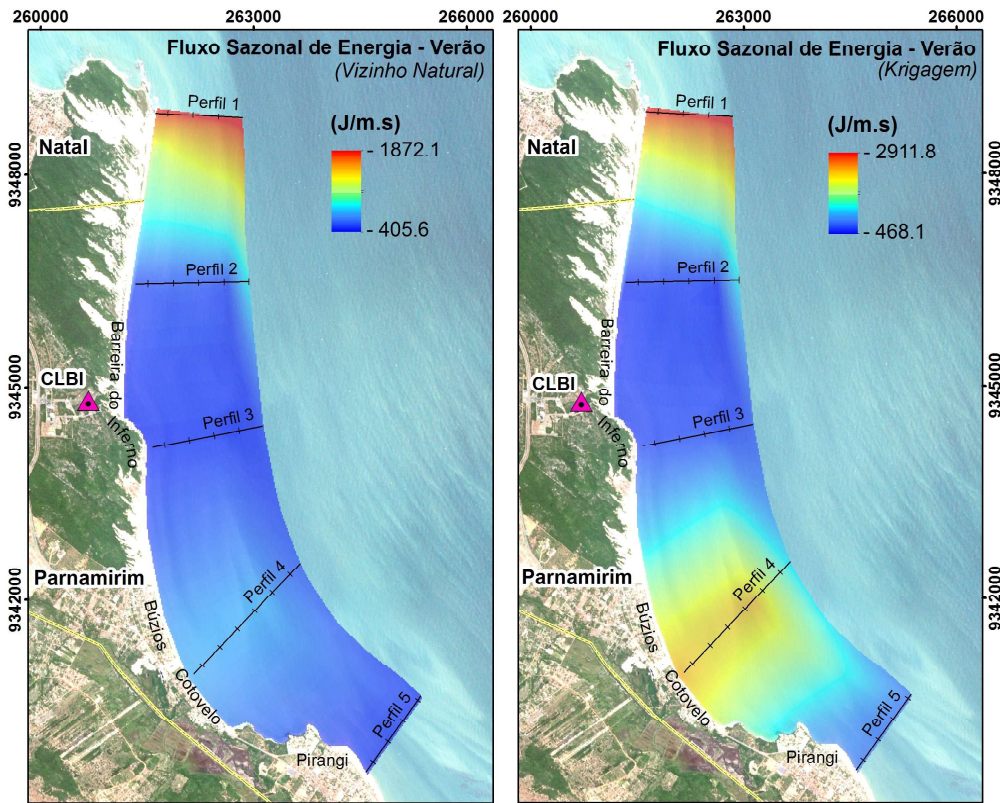


Figura 15 - Comparação do fluxo médio sazonal de energia durante os meses de verão.

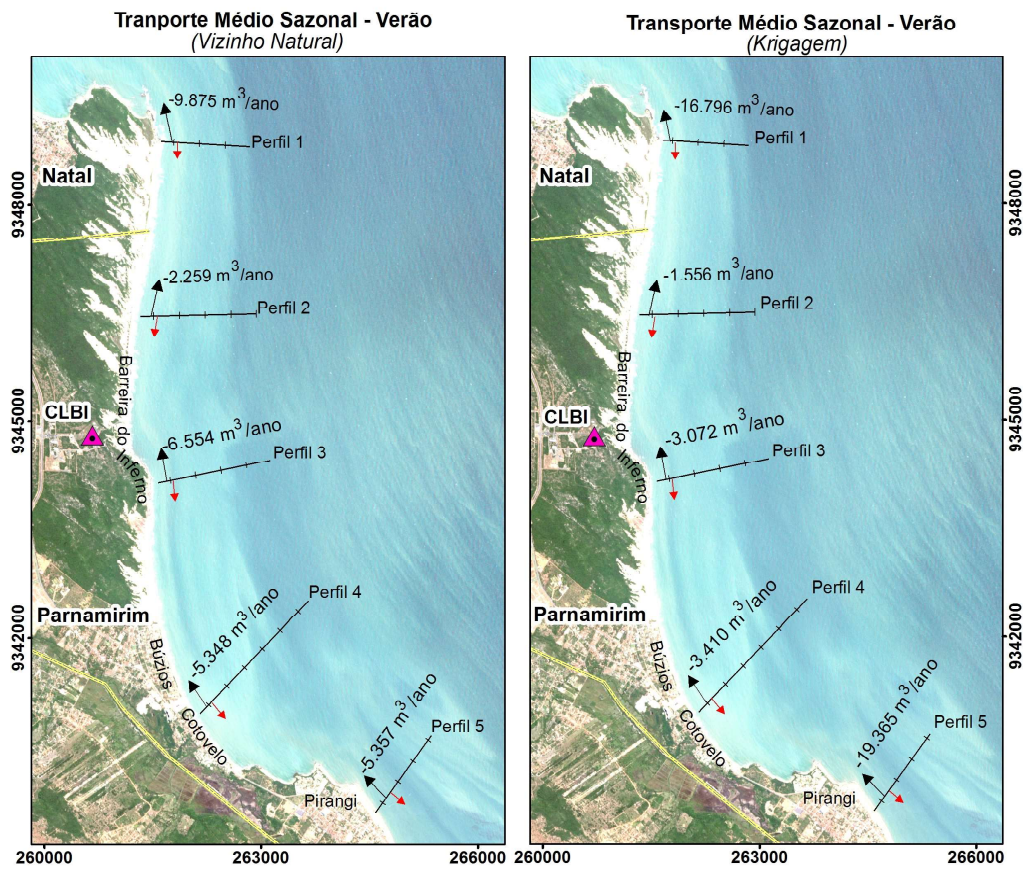


Figura 16 - Transporte médio sazonal de sedimentos para os meses de verão, positivo e negativo, para ambos os métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

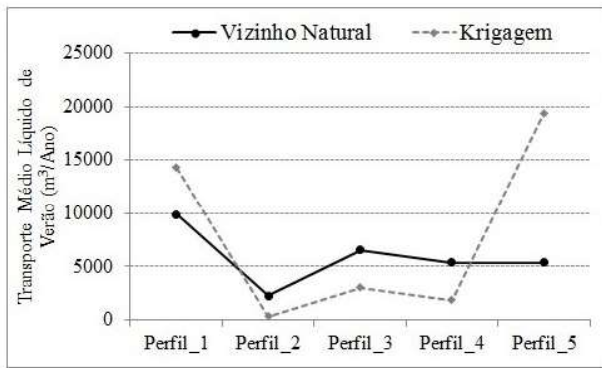


Figura 17 - Transporte médio líquido para os meses de verão propagados para ambos os métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

No transporte médio de inverno, quanto às taxas positivas e negativas (Figura 19), verifica-se que para as taxas negativas dos perfis 2, 3 e 4 os valores obtidos pelo método interpolador Vizinho Natural foram superiores aos obtidos pelo método *Krigagem*. Contudo, o Perfil 1, apresentou as maiores taxas $-33.858,8 \text{ m}^3/\text{ano}$ e nos perfis 1 e 5 as taxas obtidas pelo método interpolador *Krigagem* foram ainda superiores com $-39.398,21$ e $-23.184,65 \text{ m}^3/\text{ano}$, respectivamente. As taxas para o transporte médio positivo foram muito baixas para ambos os interpoladores e em todos os perfis, corroborando com a predominância do transporte no sentido S-N.

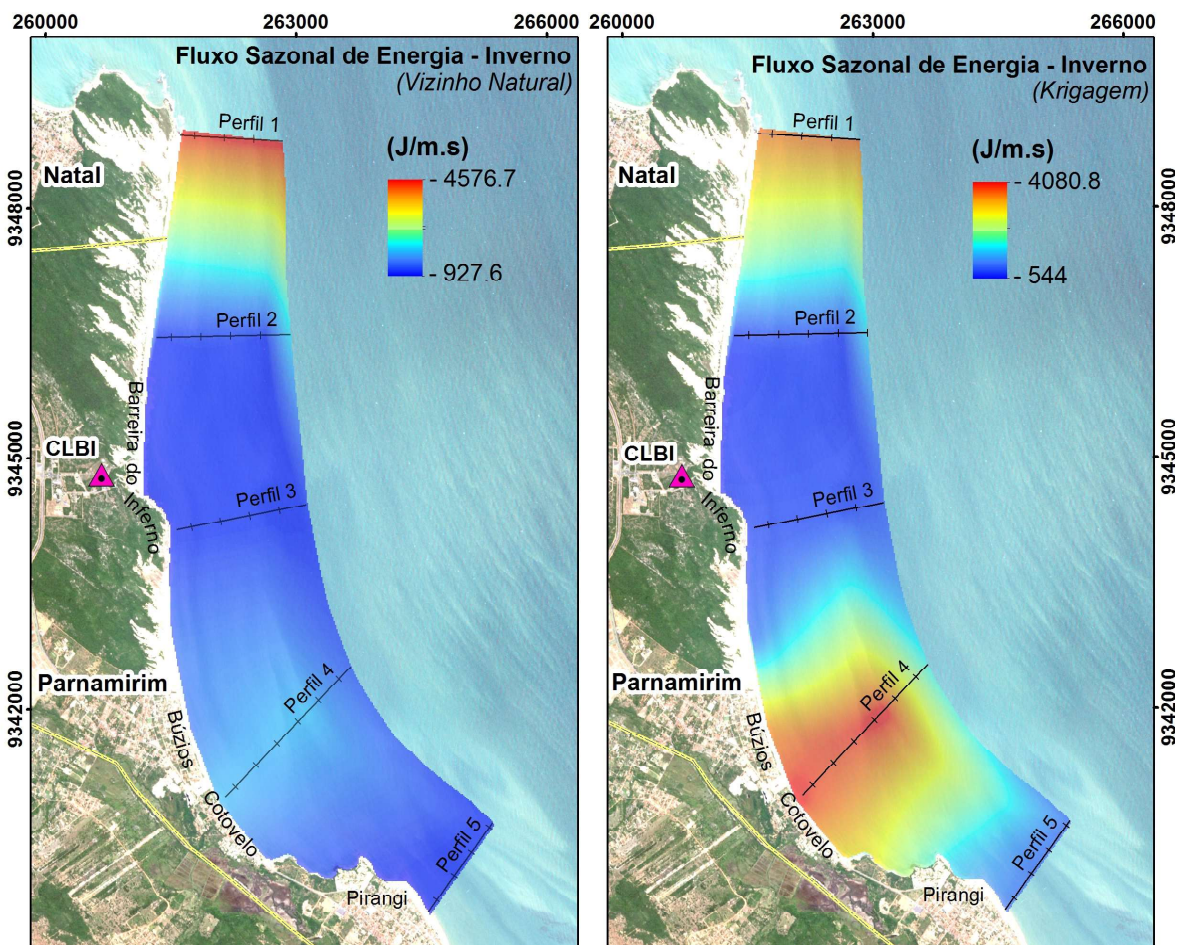


Figura 18 - Comparação do fluxo médio sazonal de energia durante os meses de inverno.

O balanço líquido total de inverno indicou que para o Perfil 1 o transporte é expressivamente superior aos demais perfis em ambos os métodos interpoladores (Figura 20). Nos meses de inverno, a porção extremo norte

da área, está submetida a uma forte intensidade tanto das correntes de E quanto das correntes de ESE, resultando num fluxo de energia e transporte longitudinal de sedimentos altíssimos, se comparados ao período de verão.

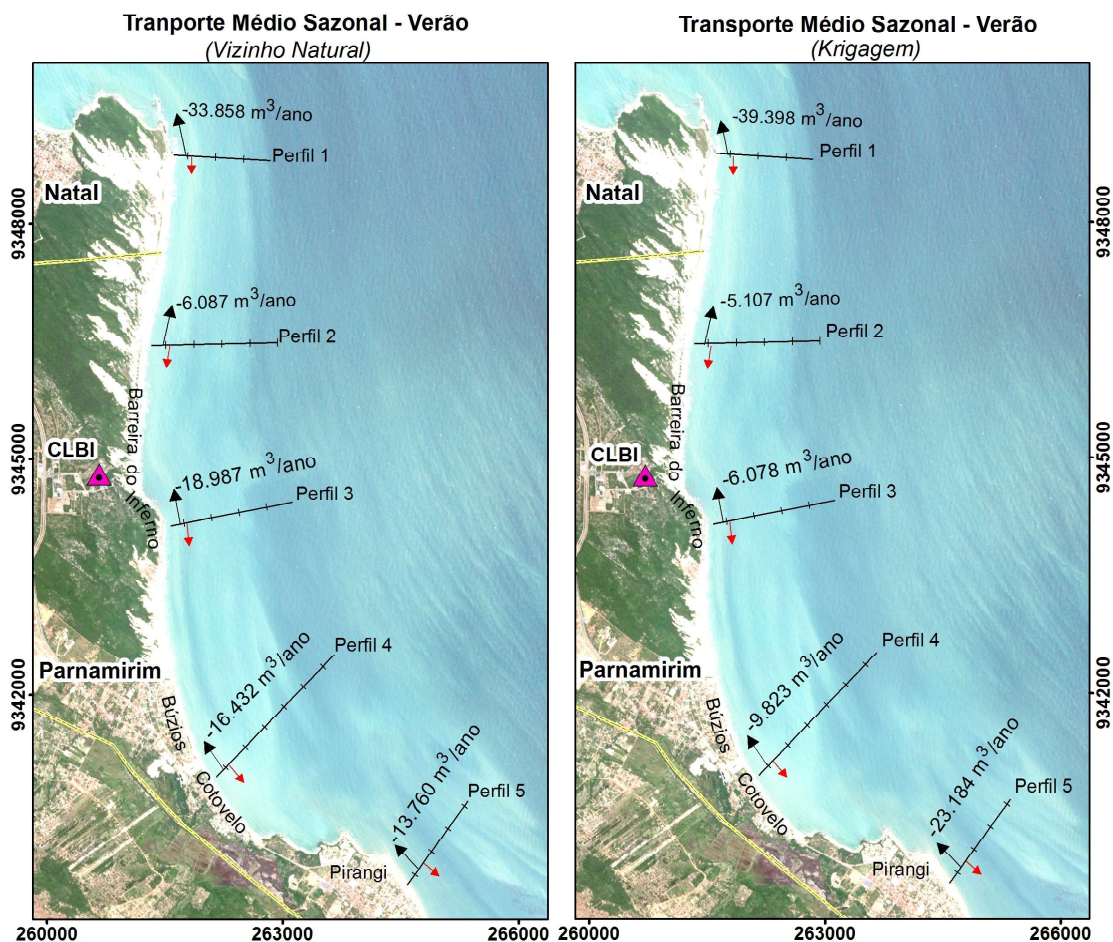


Figura 19 - Transporte médio sazonal de sedimentos para os meses de inverno, positivo e negativo, para ambos os métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

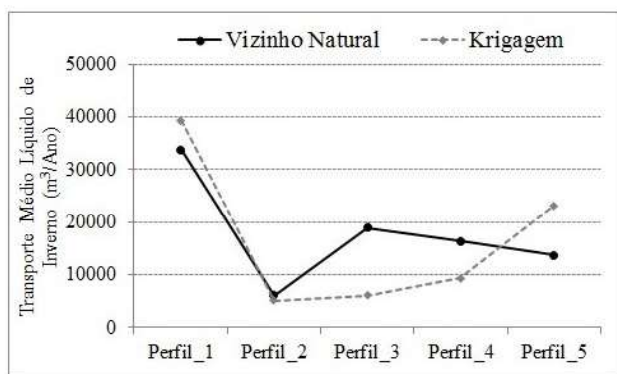


Figura 20 - Transporte médio líquido de inverno propagados para ambos os métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

Conclusões

Na análise da série temporal de Hs entre os anos de 1948 a 2008, fornecido pelo banco de dados do SMC-Brasil, notou-se que não ocorreram alterações expressivas para esse parâmetro. Nos períodos de preamar e baixamar, as alturas de onda sempre estiveram em

torno de 2,4m e 0,7m, respectivamente. A amplitude de onda esteve em torno de 0,83m e o valor médio de altura significativa ficou em torno de 1,5m.

A porção norte da faixa litorânea da Barreira do Inferno, em todos os casos avaliados, foi onde ocorreram os maiores valores de altura, de 1,7m em condições médias de baixamar, alcançando valores superiores a 2,7m sob condições extremas de preamar. Na porção sul da Barreira do Inferno, devido a conformação e a profundidades rasas, foi onde ocorreram os menores valores de altura de onda, variando de 1,0 a 2,0m, para os procedimentos metodológicos similares.

Nas simulações de ondas com os dados batimétricos obtidos pelos dois métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem, considerando-se as ondas prevaletentes de ESE e E, houve variações no campo de propagação da magnitude das correntes decorrentes quanto aos dois modelos de interpoladores empregados Vizinho Natural e Krigagem. As simulações com o

método interpolador *Krigagem* ficaram melhor evidenciadas quando propagadas as categorias de ondas de ESE, pois destacou algumas das feições morfológicas na faixa litorânea que influenciaram no campo direcional das ondas e na velocidade das correntes costeiras, fato reduzido no resultado das simulações com o método interpolador *Vizinho Natural*.

Portanto, conforme os resultados obtidos, o método interpolador *Krigagem* é o mais apropriado para a identificação de feições morfológicas em setores praias rasos. Contudo, ambos os modelos de interpoladores mostraram resultados análogos ao término dos cálculos de TLS, em que as taxas brutas de transporte longitudinal médio apresentaram semelhanças quando ao sentido dominante do transporte, como igualmente na magnitude do volume transportado.

Considerando-se que valores obtidos para o TLS por meio de modelagem computacional devem ser interpretados como valores aproximados e com a tendência de representação dos valores e comportamentos reais *in loco*, as alterações apresentadas pelos métodos interpoladores *Vizinho Natural* e *Krigagem* se mostram negligenciáveis. Por exemplo, notou-se que o modelo utilizado previamente não se mostrou sensível às isóbatas inseridas por interpolação nos métodos *Vizinho Natural* e *Krigagem*. Portanto, este trabalho contribui para o entendimento de que o emprego do pacote computacional SMC-Brasil para cálculos de TLS na faixa litorânea leste do RN, com base apenas na CN-22100, não realça variações expressivas com uso de diferentes métodos interpoladores utilizado apenas a carta náutica.

Na área de estudo, o potencial do TLS anual é de cerca de 50.000 m³/ano no sentido S-N. A análise do transporte longitudinal de sedimentos de acordo com a sazonalidade, meses mais e menos chuvosos, demonstrou coerência nas tendências para cada período sazonal. Ou seja, o período de inverno ou chuvoso (meses de junho, julho e agosto) mostrou-se como o de maior contribuição de sedimentos para o transporte médio anual, porquanto é quando ocorre um maior aporte de sedimentos do continente para a faixa litorânea. Além disso, é nesse período sazonal que predominam os ventos mais energéticos do ano, contribuindo ainda mais para o aumento na energia das forças motrizes hidrodinâmicas e, conseqüentemente, no aumento do volume de TLS. Para o período de verão ou seco (meses de dezembro, janeiro e fevereiro) os ventos são mais brandos e, por conseguinte, as taxas de TLS são menos expressivas.

Comparativamente, o TLS na faixa litorânea da Barreira do Inferno é menor do que os valores avaliados para a praia de Ponta Negra, na vizinhança à norte. Embora as praias da Barreira do Inferno e de Ponta Negra possuam tendências direcionais similares quanto ao TLS, a magnitude do potencial longitudinal do transporte de sedimentos médio anual para a faixa litorânea da Barreira do Inferno se mostrou 10 vezes inferior.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa para a realização dos trabalhos e aos Programas de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) e Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), ambos da UFRN, pelo apoio logístico e de infraestrutura.

Referências Bibliográficas

- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geology**, v.38, p. 215-224, 2014.
- ARAÚJO, D. J. C.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E. Evolução decadal da taxa de transporte longitudinal de sedimentos em praias urbanas da zona costeira de Natal/RN. In: VIII Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras de Países de Expressão Portuguesa, 8., 2015, Lisboa, **Anais...** Lisboa: APRH. 2015. p. 1-10.
- BAYRAM, A.; LARSON, M.; HANSON, H. A new formula for the total longshore sediment transport rate. **Coastal Engineering**, v. 54, p. 700-710, 2007.
- BIRD, E. C. F. **Coastal Geomorphology: an introduction**. London: Wiley, 2008. 411p.
- BIRD, E. C. F. (2015). Causes of beach erosion. In: BIRD, E.C.F.; LEWIS, N. (org.) **Beach Renourishment**. Editora Springer, Switzerland: p. 7-28.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, part I, model description and validation. **Journal Geophysical Research**, v. 104, n.4, p. 7649 - 7666, 1999.
- BORGMAN, L. E. Directional spectrum estimation for the Sxy gages. Technical Report., **Coastal Engineering Research**

- Center, Vicksburg, Miss. 104p. 1984.
- BROSSARD, J.; DUPERRET, A. Coastal chalk cliff erosion: experimental investigation on the role of marine factors. Coastal Chalk Cliff Instability. **Geological Society**, v. 20, p. 109-120, 2004.
- BROWN, A. C.; MCLACHLAN, A. Sandy shores ecosystems and threats facing them: some predictions for the year 2025. **Environmental Conservation**, v. 29, p. 62-77, 2002.
- BRUUN, P. (1954). **Coast Erosion and the Development of Beach Profiles**. Beach Erosion Board. Technical Memorandum, 44p.
- BULHÕES, E. M. R.; DRUMOND, M. K. Análises e testes de métodos de interpolação para dados batimétricos e granulométricos: estudo de caso em Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Caderno de Estudos Geoambientais**, v. 3, n.1, p. 05-31, 2012.
- BUSMAN, D. V.; AMARO, V.E.; PRUDÊNCIO, M.C. Comparison of prognostic models in different scenarios of shoreline position on Ponta Negra beach in Northeastern Brazil. World Academy of Science, **Engineering and Technology**, v.8, p.17-21, 2014.
- COLLINS, F. C; BOLSTAD, P. V. A. A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. In: Proceedings of the third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, **Anais...** Santa Fe: p. 21-25, 2001.
- CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGIRRE, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 72, p. 56-68, 2013.
- CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. 2009. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2009. 463p.
- COWELL, P. J.; THOM, B. G. Morphodynamics of coastal evolution. In: Carter, R. W. G.; Woodroffe, C. D. (Eds) **Coastal evolution, late quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge: Cambridge University Press. 1995, p. 33-86.
- DEAN, R. G. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. University of Delaware, 1977, 45p.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. Coastal process with engineering applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 475p.
- DEWEZ, T. J. B.; ROHMER, J.; REGARD, V.; CNUDDÉ, C. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, v. 65, p. 702-7070, 2013.
- FERNANDEZ, L. R.; AMARAL, R. F. Paisagem costeira do litoral do estado do Rio Grande do Norte (Brasil): evolução temporal e padrões espaciais dos campos de dunas móveis. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 13, n. 1, p. 45-59, 2013.
- FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, v. 24, n. 2, p. 180-190, 1928.
- GÜNER, H. A.; ARI.; YÜKSEL, Y.; ÇEVİK, E. O. Longshore Sediment Transport-Field Data and Estimations Using Neural Networks, Numerical Model, and Empirical Models. **Journal of Coastal Research**, v. 29, n. 2, p. 311-324, 2013.
- GURGEL, D. F. **Modelagem do transporte de sedimentos na zona costeira da Barreira do Inferno – RN, através do SMC-Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2017. 111p.
- HALLERMEIER, R. J. Sand Transport Limits in Coastal Structure Design, Proceedings, Coastal Structures '83, **American Society of Civil Engineers**, p. 703-716. 1983
- HARTKAMP, A. D.; BEURS, K.; STEIN, A.; WHITE, J. W. Interpolation techniques for climate variables, **NRG-GIS Series 99-0 CIMMYT**, Mexico, 1999.
- HU, K.; LI, B.; LU, Y.; ZHANG, F. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil Mercury content. **Environment Science**, v.25, p. 132-137, 2004.
- JIANG, W. A.; HUGHES, M.; COWELL, P.; GORDON. A.; SAVIOLI, J. C.; RANASINGHE, R. A hybrid model of swash-zone longshore sediment transport on reflective beaches. In: XXXII Proceedings International Conference on Coastal Engineering (ICCE), 32., 2010, Shanghai: ASCE, 2010. p. 1-12.
- KAMPHUIS, J. W. Alongshore sediment transport rate. **J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.** ASCE, v. 117, n. 6, p. 624-641, 1991.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Eds) 2009 **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo. Editora Oficina de textos, 2009, p. 213-234.
- KOMAR, P. D. 1998. **Beach Processes and Sedimentation**. Second ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 544p.
- MAFI, S.; YEGANEH-BAKHTIARY, A.; KAZEMINEZHAD,

- M. H. Prediction formula for longshore sediment transport rate with M5' algorithm In: Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). **Journal Coastal Research**, n. 65, p. 2149-2154, 2013.
- MMA (2018) **Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil: documento temático**. Publicação MMA, 167p.
- MIL-HOMENS, J.; RANASINGHE, R.; VRIES, J. S. M. V. T.; STIVE, M. J. F. Reevaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. **Coastal Engineering**, v. 75, p. 29-39, 2013.
- MOURA, J. E.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; AMARO, V. E. Evaluation of the Influence of Digital Elevation Models on a Hydrodynamic Circulation Model. **Journal of Coastal Research**, p. 1140-1144, 2011.
- NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A.T.; ZIMMERMANN, J.; NICHOLLS, R.J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding—A Global Assessment. **PLoS ONE** 10(3): e0118571. PMID:25760037, 2015.
- NORDSTROM, K. F.; MAURIELLO, M. N. Restoring and maintaining naturally-functioning landforms and biota on intensively developed barrier islands under a no-retreat alternative. **Shore & Beach**, v. 69, n. 3, p. 19-28, 2001.
- POLEYKETT, J.; FRIEND, P. L.; BLACK, K. S.; WRIGHT, M. R.; DAVIDSON, M. A.; MORTON, P. The application of an active sediment tracing technique to assess the efficacy of nearshore placement of dredged material for beach nourishment purposes. **Dredging Summit & Expo**, v. 18, p. 31-46, 2018.
- REGUERO, B. G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F. J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I. J. A Ocean Global Wave (GOW) Calibrated Reanalysis from 1948 Onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, 2012.
- ROBERTS, C. M.; HAWKINS, J. P. Extinction risk in the sea. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 14, p. 241-246, 1999.
- SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; AMARO, V. E.; SANTOS JR, O. F. Ponta Negra beach, Natal, Brazil: A roll and rock story. **Journal of Coastal Research**, v.75, p. 815-819, 2016.
- SHANAS, P. R.; KUMAR, S. V. Coastal processes and longshore sediment transport along Kundapura coast, central west coast of India. **Geomorphology**, v. 214, p. 436-451, 2014.
- SILJEG, A. Digitalni model reljefa u analizi geomorfometrijskih parametara – primjer PP Vransko jezero, Doktorski rad. PMF, Sveuciliste u Zagrebu, 2013. 187p.
- STRAMMA L, FISCHER J, BRANDT, P.; SCHOTT, F. (2003) Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. In: GONI, G. J.; MALANOTTE-RIZZOLI, P. (Ed.) **Interhemispheric water exchange in the Atlantic Ocean**, Elsevier, Amsterdam: p. 1-22.
- TAQUEZ, D. E. D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno-Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2017. 217p.
- USACE (1984) **Shore Protection Manual**. Publicação USACE v. 1, 652p.