

Análise multitemporal da variação da linha de costa no setor centro-sul da Ilha de Santa Catarina, Brasil

Multitemporal analysis of coastal changes along the central-southern sector of the Santa Catarina Island, southern Brazil

Cristian Nunes Estevam¹ , Liliana Sayuri Osako² , José Arthur Antonio Francisco³ 

¹Universidade de São Paulo - USP, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP: 05508-080, São Paulo, SP, BR

(cristian.estevam@usp.br)

²Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Geologia, Florianópolis, SC, BR (liliana.osako@ufsc.br)

³Consórcio Intermunicipal Serra Catarinense, Florianópolis, SC, BR (jose.arthur.tui@gmail.com)

Recebido em 18 de fevereiro de 2021; aceito em 13 de outubro de 2021.

Resumo

O reconhecimento e a quantificação de tendências da variação da linha de costa são de fundamental importância para o entendimento dos processos que moldam os ambientes costeiros, dando suporte à gestão dessas áreas. Este trabalho apresenta os resultados da análise da variação da linha de costa de um período de 78 anos em nove arcos praias do setor centro-sul da Ilha de Santa Catarina com base em fotografias aéreas de 1938 a 2016. Três modelos espaciais foram gerados no Digital Shoreline Analysis System com a identificação de feições indicadoras de linha de costa: modelo E (limite entre praia-duna), modelo K (limite entre a área seca-molhada) e modelo M (linha de água instantânea). Os resultados mostram heterogeneidade entre os modelos espaciais com a variação média da linha de costa de $0,05 \pm 0,12$ m/ano para a linha E, $0,12 \pm 0,25$ m/ano para K e $-0,20 \pm 0,20$ m/ano para M. O modelo E apresenta dispersão de 0,27 m e melhor ajuste às mudanças da linha de costa. O modelo K destaca-se pela alta dispersão (0,35 m) e retrata razoavelmente as mudanças costeiras. O modelo M mostra dispersão de 0,28 m e baixa confiabilidade na representação da variação da linha de costa. O processo de acreção é identificado nos arcos praias dos Açores-Pântano do Sul e Campeche-Joaquina, sendo responsável pelo aporte contínuo de sedimentos para os sistemas eólicos adjacentes. O processo erosivo é identificado nos arcos praias da Armação-Caldeirão e do Morro das Pedras-Campeche. Os arcos praias de Naufragados, Lagoinha do Leste, Matadeiro, Mole e Galheta exibem relativa estabilidade.

Palavras-chave: Mudanças costeiras; Análise espacial; Digital Shoreline Analysis System; Variabilidade; Feições indicadoras de linha de costa; Florianópolis.

Abstract

The identification and quantification of coastal changes are of fundamental importance to understand the processes that model coastal environments, supporting the management of these areas. This study presents the results of the analysis of the variations of the 78-year period coastline in nine beach arcs of the central-southern sector of Santa Catarina Island, using as basis aerial photographs from 1938 to 2016. Three spatial models were generated via the Digital Shoreline Analysis System, with the identification of features indicating shoreline type E (beach-dune limit), K (dry area-wet area limit), and M (line of instantaneous water). The results show heterogeneities among the spatial models, with a mean shoreline variation of 0.05 ± 0.12 m/year for indicator E; 0.05 ± 0.12 m/year for indicator K, and -0.20 ± 0.20 m/year for indicator M. Model E presents a dispersion of 0.27 m and is the best fit to shoreline changes. Model K stands out for the high dispersion of 0.35 m and reasonably reflects coastal changes. Model M yields a dispersion of 0.28 m and is the least reliable in representing coastal changes. Accretion is identified in the Açores-Pântano do Sul and Campeche-Joaquina beach arcs and is a consequence of continuous input of sediments to adjacent aeolian systems. Erosion is identified along the Armação-Caldeirão and Morro das Pedras-Campeche beach arcs. The Naufragados, Lagoinha do Leste, Matadeiro, Mole, and Galheta beach arcs exhibit relative stability.

Keywords: Coastal change; Spatial analysis; Digital shoreline analysis system; Variability; Shoreline indicators; Florianópolis.

INTRODUÇÃO

A variação da linha de costa é o resultado da interação dinâmica de processos físicos que ocorrem na interface entre terra, mar e ar e condicionam o balanço sedimentar de uma praia (Dolan et al., 1980; Anders e Byrnes, 1991). O principal registro da variação da linha de costa está associado ao processo erosivo. Processos erosivos na costa são decorrentes do déficit no balanço sedimentar de uma praia que, pela ação de ondas, correntes e marés, transporta sedimentos do sistema praial e ocorrem com frequência em eventos climáticos extremos denominados “ressacas” (Bird, 1987; Krueger, 2011; Muehe, 2018). É um processo complexo que decorre de ação natural, antrópica ou de ambas combinadas, que resulta na retração da linha de costa (Zhang et al., 2004; Horn Filho, 2006; Klein et al., 2006; Fletcher et al., 2012).

Segundo Bird (1985, 1987), aproximadamente 70% das praias arenosas do globo estão submetidas à erosão costeira, o que causa degradação de ambientes costeiros, prejuízos econômicos e perigos aos habitantes que vivem nessas regiões (Valiela, 2006). Desde a década de 1990, os trabalhos que tratam da variação da linha de costa têm apresentado taxas obtidas com a modelagem matemática em Sistemas da Informação Geográfica (SIG) indicando que a condição erosiva é comum (Morton et al., 2005; Alberico et al., 2012; Fletcher et al., 2012; Nebel et al., 2012; Ford, 2013; Kabuth et al., 2014; Silva et al., 2016). No estado de Santa Catarina, a erosão é identificada em 13% da costa oceânica e apresenta tendência de aumento nas duas últimas décadas (Muehe, 2018).

O estado de Santa Catarina concentra 39,6% da população em apenas 9,9% do território, o que evidencia grande pressão demográfica sobre a zona costeira (Estevam, 2019). Em Florianópolis, a população de 500 mil habitantes tende a triplicar com a presença de turistas durante o verão (Backes, 2017; Paraizo, 2019). A Ilha de Santa Catarina (ISC), localizada no município de Florianópolis (Figura 1), possui praias com registro de erosão costeira, com intensidades e períodos de ocorrência variados (Castilhos, 1995; Simó e Horn Filho, 2004; Schmidt et al., 2013; Klein et al., 2016a; Silva et al., 2016; Horn Filho et al., 2018). A partir de 2010, a retração da linha de costa vem sendo registrada com frequência na ISC, principalmente pelas “ressacas” intensas que atingem as praias oceânicas, resultando em severos danos ambientais e prejuízos econômicos (Krueger, 2011; Horn Filho et al., 2018; Silva et al., 2018).

Em vista disso, este trabalho objetiva analisar a variação da linha de costa oceânica na porção centro-sul da ISC, entre os anos de 1938 e 2016. Para a análise, geraram-se três modelos da variação da linha de costa no programa Digital Shoreline Analysis System (DSAS) utilizando feições indicadoras de linha de costa E (limite entre praia-duna), K (limite entre área seca-molhada) e M (linha de água instantânea)

identificadas em fotografias aéreas históricas. De maneira complementar, fez-se uma análise comparativa do erro padrão da estimativa e das tendências da variação da linha de costa entre os modelos gerados. Neste estudo, analisaram-se nove arcos praias na ISC: Naufragados; Solidão; Açores-Pântano do Sul; Lagoinha do Leste; Matadeiro; Armação-Caldeirão; Morro das Pedras-Campeche-Joaquina; Mole; Galheta (Figura 1C).

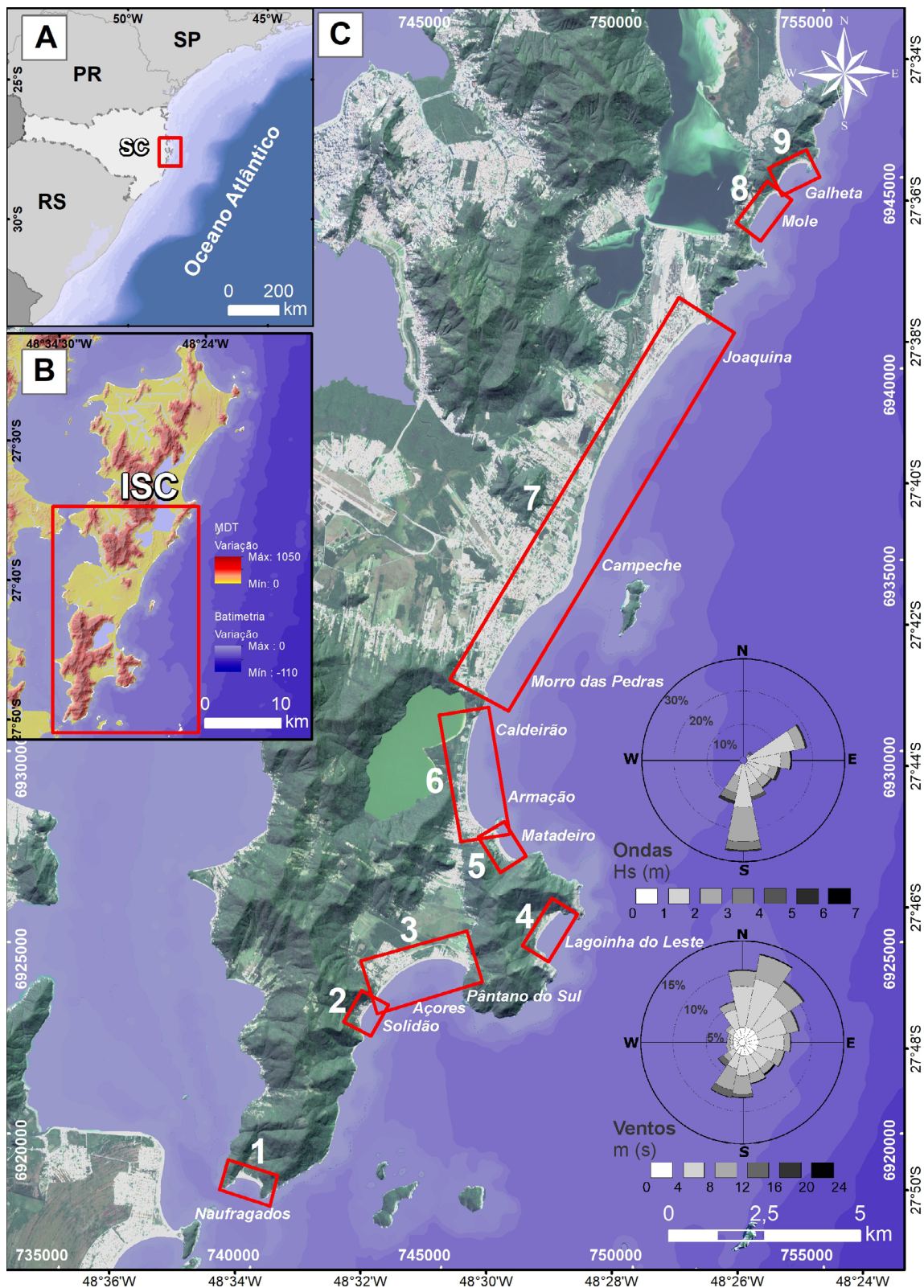
TRABALHOS ANTERIORES

Estudos que avaliam as mudanças costeiras foram desenvolvidos com base na fotogrametria aérea nas décadas de 1920 e 1930 e tiveram grande avanço metodológico nas décadas de 1980 e 1990, período no qual foram sistematizados os processos de mapeamento da linha de costa e o cálculo estatístico da taxa de variação da linha de costa (Dolan et al., 1980; Dolan et al., 1985; Anders e Byrnes, 1991; Crowell et al., 1991). Pelo uso de um sistema de informação geográfica (SIG), as análises espaciais ficaram mais acuradas, rápidas e tiveram sucessivos aprimoramentos metodológicos (Danforth e Thieler, 1992; Thieler e Danforth, 1994a, 1994b; Himmelstoss et al., 2018). Contudo ainda há divergências na determinação da linha de costa, conforme descrito por Boak e Turner (2005), o que resulta em modelos que representam variações relacionadas a processos e escalas de tempo diferentes. A linha de costa possui caráter ambíguo e pode ser representada pelas feições indicadoras de linha de costa (FILC). Os modelos das mudanças costeiras que utilizam FILC suscetíveis às variações diurnas e cíclicas no nível do mar reproduzem a variabilidade em seus resultados (Anders e Byrnes, 1991; Thieler e Danforth, 1994a). Essas variações verticais do nível do mar podem determinar o deslocamento da FILC ao longo de uma praia, tendenciar a representação da evolução costeira e afetar o significado geológico do modelo construído, conforme explicado por Thieler e Danforth (1994a).

A determinação da FILC para gerar modelos costeiros é fruto de discussões nesta pesquisa, que faz o uso de três linhas de costa distintas:

- linha de água instantânea ou linha M (Anders e Byrnes, 1991; Crowell et al., 1991; Thieler e Danforth, 1994b; Boak e Turner, 2005; Morton et al., 2005);
- limite da área seca-molhada ou linha K (Araújo et al., 2009; Klein et al., 2016a);
- limite entre praia-duna ou linha E (Hwang, 1981; Boak e Turner, 2005; Ford, 2013).

É importante destacar que cada linha possui predominância de processos físicos distintos. Enquanto a FILC E é submetida a mudanças de longo prazo, as FILC K e M são constantemente submetidas à variação de maré.



Fonte: Imagem Sentinel-2 (ESA Copernicus Sentinel Data, 2018) e rosetas de direção de ondas e ventos modificados de Silva et al. (2018).

Figura 1. (A) Localização da Ilha de Santa Catarina; (B) modelo digital de terreno (SDE, 2016) da Ilha de Santa Catarina exibindo estruturação SSW-NNE do embasamento cristalino; (C) área de estudo na porção centro-sul da Ilha de Santa Catarina com destaque em vermelho para os nove (9) arcos praias estudados.

Na ISC, a quantificação da variação da linha de costa foi realizada por Dalbosco (2013), Klein et al. (2016a), Silva et al. (2016) e Marins (2020) com base na FILC K. Esses autores constataram a rotação no sentido horário da posição da linha de costa, que ocorre em arcos praias extensos e é análoga ao modelo conceitual de Harley et al. (2011). Segundo Dalbosco (2013) e Silva et al. (2016), essa rotação da linha de costa é condicionada pela deposição de sedimentos nas áreas a norte e pela erosão nas áreas a sul. Outra importante constatação, que é consenso entre os autores, é que a ocupação antrópica adjacente às praias potencializa os danos causados pela erosão (Klein et al., 2016a). O trabalho de Marins (2020) engloba as praias analisadas nesta pesquisa. A autora advoga para a erosão predominante nas praias da Solidão, Açores, Pântano do Sul, Lagoinha do Leste, Armação, Caldeirão, Morro das Pedras, Campeche, Mole e Galheta, com base no modelo gerado pela FILC E como linha de base.

ASPECTOS AMBIENTAIS

A ISC está situada no sul do Brasil, na porção insular do município de Florianópolis. No contexto geológico, a ISC é formada por extensos maciços rochosos ígneos pertencentes ao Batólito Florianópolis e estruturados na direção preferencial SSW-NNE (Basei et al., 2011; Tomazzoli et al., 2018). Essa estruturação do embasamento cristalino condicionou a deposição dos sedimentos quaternários costeiros, que possuem geometria também controlada pela incidência de energia de ondas, marés, correntes e ventos (Dillenburger e Hesp, 2009). Esse controle deposicional fica evidente ao se analisar a fisiografia da ISC e a direção da linha de costa atual que é análoga ao arranjo do embasamento (Figura 1).

As praias arenosas oceânicas da ISC são expostas ou semi-expostas à ação de ondas e podem ser agrupadas de acordo com proposta de Horn Filho e Leal (2017). Estão submetidas ao regime de micromaré astronômica, com variação entre 0,4 e 1,2 m (Truccolo et al., 2004), e a oscilações causadas pela maré inercial (Araújo, 2020). As variações inerciais podem representar aproximadamente 40% das oscilações verticais do nível do mar (Araújo, 2020) e estão diretamente ligadas aos sistemas de baixa pressão (Massa Tropical Atlântica), à passagem de frentes frias (Massa Polar Atlântica) e à ocorrência de ciclones extratropicais que atuam no litoral sul do Brasil (Monteiro e Furtado, 1995). Esses sistemas atmosféricos são responsáveis pela predominância de ventos do quadrante nordeste e ventos intensos do quadrante sul (Klein et al., 2016b; Silva et al., 2016).

O clima de ondas atuante foi analisado por Silva et al. (2016) durante o período de 1979 a 2015 e consiste na predominância de ondas de direção sul (42,2%), leste (28,4%), sudeste (18,2%) e nordeste (8,9%) com altura média entre

1,0 e 1,5 m (Araújo et al., 2003; Dillenburger e Hesp, 2009). Ondas de tempestade são pouco frequentes, porém exercem grande influência sobre os eventos erosivos sendo combinadas frequentemente com a atuação de maré de sizígia (Krueger, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo usou como base de dados as fotografias aéreas históricas obtidas nos anos de 1938, 1957, 1978, 2002, 2012 e 2016. Cada coleção de fotografias aéreas compõe uma série de análise multitemporal, que totaliza um período de 78 anos. Os procedimentos de tratamento, análise e modelagem dos dados foram realizados nos programas QGIS 3.4 e ArcGIS 10.6 e do módulo de extensão DSAS 5.0. Para todos os procedimentos, adotou-se o *datum* SIRGAS2000 e a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) Zona 22S (EPSG 31982) como sistema de referência, de acordo com o recomendado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) e por Himmelstoss et al. (2018).

O método de trabalho foi dividido em seis fases:

- inventário de fotografias aéreas;
- georreferenciamento;
- vetorização das feições indicadoras de linha de costa;
- cálculo das incertezas;
- construção da tabela de atributos;
- modelagem.

Esse método se baseou nos trabalhos de Anders e Byrnes (1991), Thieler e Danforth (1994a), Boak e Turner (2005), Fletcher et al. (2012), Ford (2013) e Himmelstoss et al. (2018) e está sintetizado no fluxograma a seguir (Figura 2).

Inventário de fotografias aéreas

As coleções de fotografias aéreas utilizadas neste trabalho são oriundas do acervo de dados da Secretaria do Patrimônio da União (SPU), da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE/SC) e da Prefeitura Municipal de Florianópolis (PMF) e foram obtidas em aerolevantamentos realizados nos anos 1938, 1957, 1978, 2002, 2012 e 2016. As ortofotos do ano de 2012 da SDE serviram como base cartográfica para o georreferenciamento das fotografias aéreas de 1938, 1957, 1978, 2002 e 2016. Essa escolha deve-se à qualidade das ortofotos de 2012 que foram obtidas na escala 1:5.000 pelo Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens Digitais (SAAPI) (Ruy et al., 2007) e classificadas em classe A no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (Brasil, 1984). Esses produtos cartográficos possuem resolução espacial de 0,39 m e erro padrão (EP) máximo estimado em 1,5 m para região próxima da área estudada (Souza et al., 2017).



Figura 2. Fluxograma para a geração dos modelos da variação da linha de costa.

As fotografias aéreas de 1938 a 2016 possuem características distintas principalmente em relação à escala e à resolução espacial de cada levantamento (Tabela 1). Os órgãos que disponibilizam essas fotografias aéreas não possuem os parâmetros e as datas em que cada fotografia foi tomada. Portanto a ortoretificação das coleções anteriores ao ano de 2012 (ou seja, 2002, 1978, 1957 e 1938) não foi realizada pela inexistência (perda) dos parâmetros do espaço imagem (do conceito de Thieler e Danforth, 1994a). Para gerar os modelos da variação da linha de costa, definiu-se a data de aquisição para o dia 06 de agosto de cada ano. Essa data foi escolhida por representar a metade do inverno, período mais seco e de maior probabilidade de se realizar os voos de levantamento fotogramétrico para o litoral catarinense. Essa escolha segue a proposta de Thieler e Danforth (1994a): quando faltam parâmetros ou informações, é possível fazer simplificações realistas nos dados.

Georreferenciamento

O procedimento de georreferenciamento das fotografias aéreas foi realizado no programa QGIS 3.4 com base nas normas estabelecidas pela Diretoria de Serviços Cartográficos (DSG, 2016) e pela SPU (2019). Os pontos de controle do georreferenciamento (GCP) foram alocados em feições discerníveis

e com forma bem definida, preferencialmente em matacões isolados, fraturas nas rochas, construções e bifurcações de estradas que não mudaram ao longo do tempo de análise (Crowell et al., 1991). Conforme Rocchini e Di Rita (2005), o erro quadrático médio de aerofotos georreferenciadas e ortoretificadas em regiões planas é semelhante. Portanto, a locação dos pontos de controle foi realizada principalmente em áreas planas de modo que minimizasse possíveis erros (Rocchini e Di Rita, 2005). Os valores do erro residual dos pontos de controle utilizados tiveram sempre valor menor que uma vez e meia o valor do erro residual total (SPU, 2019). Para cada fotografia aérea, identificaram-se no mínimo 13 pontos de controle, quando utilizada a transformação polinomial de segundo grau, ou 7 pontos, quando utilizada a transformação polinomial de primeiro grau (Tabela 2). No total, foram georreferenciadas 48 fotografias aéreas, com uma média de 18,8 pontos de controle por fotografia, totalizando 903 pontos de controle. O método de reamostragem adotado foi por convolução cúbica.

Vetorização das feições indicadoras de linha de costa

O processo de vetorização das feições indicadoras de linha de costa e da linha de base foi executado no ArcGIS 10.6 em duas

Tabela 1. Características das coleções de fotografias aéreas utilizadas.

Ano	Escala do levantamento	dpi	Tamanho do <i>pixel</i>	Fonte	Formato
1938	~1:35.000	300	-	SDE/DEGE	Analógico
1957	1:25.000	600	-	SDE/DEGE	Analógico
1978	1:25.000	600	-	SDE/DEGE	Analógico
2002	1:8.000	300	-	SPU/SC	Analógico
2012	1:5.000	-	0,39 m	SDE/DEGE	Digital
2016	1:1.000	-	0,20 m (*)	IPUF	Digital

*Reamostrado de 0,12 m para 0,20 m.

Tabela 2. Incertezas (lt) calculadas para cada arco praial entre 1938 e 2016*.

Arco praial/Ano	Incerteza total (m)					
	1938	1957	1978	2002	2012	2016
1 Nafragados	E 3,60	E 2,34	E 1,79	E 1,19	E 1,61	E 0,44
	K 3,25	K 2,27	K 1,76	K 1,28	K 1,58	K 0,31
	M 3,10	M 2,24	M 1,74	M 1,22	M 1,63	M 0,29
2 Solidão	E 2,86	E 1,78	E 1,92	E 1,30	E 1,56	E 0,54
	K 2,90	K 1,75	K 1,90	K 1,31	K 1,57	K 0,28
	M 2,91	M 1,75	M 1,90	M 1,30	M 1,58	M 0,38
3 Açores-Pântano do Sul	E 2,97	E 1,78	E 1,93	E 1,13	E 1,60	E 0,42
	K 2,85	K 1,76	K 1,92	K 1,15	K 1,61	K 0,48
	M 2,92	M 1,77	M 1,92	M 1,17	M 1,57	M 0,53
4 Lagoinha do Leste	E 2,95	E 1,70	E 1,84	E 1,25	E 1,56	E 0,78
	K 2,98	K 1,77	K 1,85	K 1,29	K 1,56	K 0,31
	M 3,08	M 1,71	M 1,83	M 1,32	M 1,57	M 0,31
5 Matadeiro	E 3,13	E 1,89	E 1,85	E 1,25	E 1,58	E 0,23
	K 3,05	K 1,74	K 1,82	K 1,29	K 1,55	K 0,32
	M 3,14	M 1,82	M 1,81	M 1,27	M 1,61	M 0,46
6 Armação	E 3,14	E 2,03	E 2,03	E 1,26	E 1,62	E 0,46
	K 3,06	K 1,99	K 1,99	K 1,28	K 1,56	K 0,38
	M 3,09	M 1,98	M 1,99	M 1,32	M 1,56	M 0,53
7 Morro das Pedras - Campeche - Joaquina	E 3,62	E 2,05	E 2,23	E 1,72	E 1,59	E 0,40
	K 3,55	K 2,05	K 2,22	K 1,74	K 1,57	K 0,41
	M 3,57	M 2,04	M 2,22	M 1,80	M 1,58	M 0,32
8 Mole	E 2,95	E 1,98	E 2,27	E 1,70	E 1,60	E 0,27
	K 2,92	K 2,01	K 2,25	K 1,71	K 1,58	K 0,39
	M 2,92	M 1,97	M 2,25	M 1,71	M 1,59	M 0,41
9 Galheta	E 3,00	E 1,98	E 2,29	E 1,70	E 1,61	E 0,33
	K 2,91	K 1,97	K 2,27	K 1,75	K 1,57	K 0,41
	M 2,95	M 2,00	M 2,25	M 1,75	M 1,57	M 0,52

*Resultados expressos em metros. Notar que os valores de incertezas do modelo E (representados pela letra E) são maiores que os do modelo M (representados por M), que, por sua vez, são maiores que do modelo K (representados por K).

etapas: vetorização pelo analista executor do projeto e vetorização por outro analista. Esse procedimento de vetorização dupla foi realizado para o cálculo do erro de vetorização (Ev).

A vetorização foi feita com base no desenho manual das FILC sobre as fotografias aéreas georreferenciadas, das mais recentes para as mais antigas. Utilizaram-se as porções centrais das aerofotos para minimizar erros relacionados à distorção radial. No total, foram vetorizadas em escala 1:2.000 três feições indicadoras de linha de costa por série temporal:

limite entre praia-duna (E), limite entre área seca-molhada (K) e linha de água instantânea (M) (Boak e Turner, 2005). A ordem de vetorização E-M-K foi concebida para minimizar o caráter subjetivo e pessoal na identificação das FILC, de modo que as linhas não se cruzem e possuam geometria paralela ou aproximadamente paralela entre si.

A linha E foi adaptada do conceito de Boak e Turner (2005) que atribui a esta linha a feição que indica o limite da presença de vegetação nas dunas. A adaptação promovida

aborda a linha E como um divisor geomorfológico entre a praia e a duna que, predominantemente, é marcado pela presença de vegetação. Quando não existe indicador claro da linha E, como em construções à beira-mar ou em áreas de campos de dunas ativas, por exemplo, não é possível desenhá-la.

Cálculo das incertezas na posição da linha de costa

A incerteza na posição da linha de costa foi calculada com base em três fontes de erros: tamanho de pixel (Ep), raiz do erro quadrático médio ($RMS\ error$) (Equação 1) e Ev (Equação 2), sendo a incerteza total calculada por meio da Equação 3 (Romine et al., 2009; Fletcher et al., 2012; SPU, 2019).

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{foto} - X_{base})^2 + (Y_{foto} - Y_{base})^2} \quad (1)$$

Fórmula para o cálculo da raiz do erro quadrático médio ($RMSe$).

Em que:

X_{foto} : coordenada projetada X em metros;
 X_{base} : coordenada cartesiana X do GCP na imagem original;
 Y_{foto} : coordenada projetada Y em metros;
 Y_{base} : coordenada cartesiana Y do GCP na imagem original;
 n : número de GCP.

$$Ev = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xi - Xm)^2}{n}} \quad (2)$$

Fórmula, Ev em metros, para o cálculo do erro de vetorização.

Em que:

Xi : valor individual;
 Xm : média dos valores;
 n : número de valores.

$$It = \pm \sqrt{Ep^2 + RMSe^2 + Ev^2} \quad (3)$$

Fórmula para o cálculo total das incertezas.

No cálculo da incerteza, não foi considerada: incerteza sazonal, pela ausência da data de obtenção das fotografias aéreas, e variação de maré, pelo fato da FILC E não ser influenciada diurnamente pelo efeito da maré. Essa escolha foi dada para realizar comparação entre os resultados sob as mesmas condições de incertezas.

O Ep ou resolução espacial é uma propriedade das imagens digitais e que pode ser obtida no próprio arquivo das fotografias aéreas digitais. O cálculo da raiz do erro quadrático médio ($RMSe$) é determinado pelo produto entre o valor do tamanho de *pixel* em metros e pelo erro residual do georreferenciamento em *pixel* (Tabela 2). O erro residual do georreferenciamento é calculado automaticamente pelo

programa QGIS que utiliza a raiz quadrada do somatório das diferenças de posições entre a fotografia aérea e a base cartográfica elevada ao quadrado (Equação 1). O erro quadrático médio adotado é o maior valor $RMSe$ obtido para o conjunto de fotografias aéreas de cada arco praiado analisado (Klein et al., 2016a).

O Ev foi calculado pela diferença entre a posição das linhas de costa vetorizadas por dois analistas. Os perfis ortogonais à linha de costa foram confeccionados e a diferença de posição dos interceptos permitiu o cálculo das distâncias entre as linhas de costa vetorizadas. O procedimento foi realizado para todas FILC dos nove arcos praiados. Os valores de Ev para cada FILC tiveram diferenças, em que o modelo E apresentou média de 1,76 m de incerteza, o modelo K 1,72 m e o modelo M 1,74 m.

Os valores diferentes de It refletem diferenças no Ev , já que Ep e $RMSe$ são os mesmos para todos os modelos.

Construção da tabela de atributos

As tabelas de atributos das feições indicadoras de linhas de costa E, M e K vetorizadas foram complementadas com os atributos referentes à data de aquisição das fotografias aéreas (*date*), às incertezas da posição da linha de costa (*uncy*) e ao grupo de análise (*group*) (Himmelstoss et al., 2018).

Com base nas linhas de costa vetorizadas foram geradas linhas paralelas denominadas de linhas de base, que servem de referência para construir os perfis de análise (Himmelstoss et al., 2018). O procedimento de confecção da linha de base foi realizado pelo *buffer* de 250 m das linhas de costa e posterior vetorização do limite interior do *buffer* localizado em terras emersas, de modo que resultasse em linhas de base paralelas às linhas de costa (Danforth e Thieler, 1992).

Modelagem no Digital Shoreline Analysis System

O primeiro passo na modelagem no DSAS foi a definição dos parâmetros utilizados para a construção do modelo. Os parâmetros são o posicionamento da linha de base e a localização dessa linha em relação à linha de costa (Himmelstoss et al., 2018).

Na modelagem do setor centro-sul da ISC, a linha de base foi posicionada na direção da terra emersa com base na linha de costa e com orientação no sentido sul-norte. Em sequência, atribuíram-se os parâmetros da linha de costa, como data, incerteza e posição de intersecção no sentido do mar.

O procedimento seguinte foi a construção dos perfis para a análise com espaçamento de 25 m e distância de suavização de 50 m de modo que intersectasse todas as linhas de costa vetorizadas. Por fim, realizaram-se cálculos estatísticos de envelope da linha de costa (*shoreline change envelope — SCE*), regressão linear ponderada (*weighted linear regression — WLR*) e o erro padrão da estimativa (*standard*

error of estimate — *WSE*) com intervalo de confiança de 95% (Figura 2).

RESULTADOS

Os resultados foram derivados de três análises distintas: análise do erro padrão da estimativa, comparação entre os modelos da variação das linhas de costa E, K e M e tendências da variação das linhas de costa. No total, calcularam-se estatísticas referentes a 2.970 perfis dispostos em nove arcos praias localizados no setor centro-sul da ISC.

Análise do erro padrão da estimativa

A análise do erro padrão da estimativa (*WSE*) revelou heterogeneidade entre os modelos construídos, no qual o modelo K apresenta os maiores valores de erro, seguido pelo modelo M e, posteriormente, pelo modelo E (Figura 3). Apesar da atribuição de valores de incertezas semelhantes, os valores calculados pelo *WSE* têm diferenças ocasionadas pela aderência da posição das FILC aos transectos dos respectivos gráficos da regressão linear ponderada, ou seja, os resíduos da modelagem provocados pela alta variabilidade da linha de costa acarretam erros maiores.

Os valores de *WSE* calculados para o modelo K apresentam maior heterogeneidade de valores, com média de 6,89 m de erro, desvio padrão de 3,59 m e valor máximo de 22,85 m. O modelo M apresenta média de 5,43 m de erro, desvio padrão de 2,89 m e valor máximo de 16,02 m. O modelo E tem a maior homogeneidade entre os modelos, com média de 3,44 m de erro, tendo como desvio padrão 1,74 m e valor máximo 13,07 m.

Os maiores valores de erro observados ocorrem principalmente nos arcos praias extensos e expostos à ação de ondas, em que a variação da linha de costa é maior e os pontos de controle possuem menor acurácia (Figura 3). Quanto maior o erro proveniente da retificação das fotografias aéreas, por exemplo, em áreas com planície costeira extensa e com menor quantidade de pontos de controle, maiores serão os valores de erro do padrão de estimativa.

Comparação entre modelos da variação da linha de costa

Os modelos da variação da linha de costa E, K e M apresentam heterogeneidades, de maneira semelhante àquelas descritas na análise do erro padrão da estimativa. A heterogeneidade dos modelos é evidenciada pela ampla distribuição de valores calculados para o envelope da variação da linha de costa (*SCE*) e que apresentam tendência homogênea para o modelo E, intermediária para o modelo M e tendência heterogênea para o modelo K (Figura 4).

Os maiores valores calculados de *SCE* foram obtidos no modelo K, que possui desvio padrão de 13,33 m, valor médio de 30,99 m e máximo de 102,38 m, valores estes semelhantes ao modelo M tanto na distribuição quanto nos valores médios. O modelo M apresenta desvio padrão de 13,31 m, valor médio de 30,81 m e máximo de 96,36 m. O modelo E tem a menor variabilidade dos valores de *SCE*, com desvio padrão de 10,95 m. Associados à baixa variabilidade estão os baixos valores de variação da linha de costa, com média de 23,00 m e máxima de 57,54 m.

O cálculo da taxa de variação da linha de costa, em metros por ano, pela regressão linear ponderada (*WLR*) indicou áreas com suscetibilidade a erosão, acreção e que possuem relativa estabilidade. Esse cálculo gerou padrão semelhante às análises descritas anteriormente. O modelo E apresenta a maior homogeneidade quanto à taxa de variação da linha de costa, com valores entre -0,54 e 0,90 m/ano. Esse modelo indica tendência sutil de acreção na área estudada, com valor médio de 0,05 m/ano e desvio padrão de 0,27 m. Esse padrão se repete ao analisar o modelo K, que indica acreção da área, com taxa média de 0,11 m/ano de variação da linha de costa. O modelo K apresenta a maior variabilidade na taxa de variação da linha de costa, com valores de -0,61 a 2,02 m/ano e desvio padrão de 0,34 m. O modelo M tem valores que indicam o predomínio da erosão nas praias estudadas, com taxa média de -0,20 m/ano e valores de variação da linha de costa entre -1,03 e 0,64 m/ano e desvio padrão de 0,27 m (Figura 4).

As maiores discrepâncias entre os modelos são causadas pela descontinuidade das tendências de variação da linha de costa ao longo dos arcos praias (Figura 4A). É possível notar que o modelo M apresenta maior descontinuidade das tendências de estabilidade, acreção ou erosão ao longo do arco praias Morro das Pedras-Campeche-Joaquina. Essa característica na descontinuidade das tendências é vista com menor frequência no modelo K. Com base na análise dos modelos E, K e M, é possível notar que o modelo E apresenta amplitude de variação de tendências sensivelmente menor em relação aos demais modelos.

Tendências da variação da linha de costa

Existem células de circulação limitadas pelo embasamento, que condicionam a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos, processos estes evidenciados pela taxa de variação da linha de costa (*WLR*). Essas células são mais bem identificadas no modelo E e são representadas pelo agrupamento das praias em seis setores que apresentam tendências particulares de estabilidade, acreção ou erosão (Figura 5).

Os setores A, C e F apontam para a estabilidade da linha de costa, com valores médios de *WLR* de $-0,02 \pm 0,62$ m/ano, $0,01 \pm 0,27$ m/ano e $0,01 \pm 0,29$ m/ano, respectivamente. Os arcos praias (Naufragados, Lagoinha do Leste, Mole e Galheta) que fazem parte dos setores A, C e F possuem forma

Erro Padrão da Estimativa - Regressão Linear Ponderada (WSE)

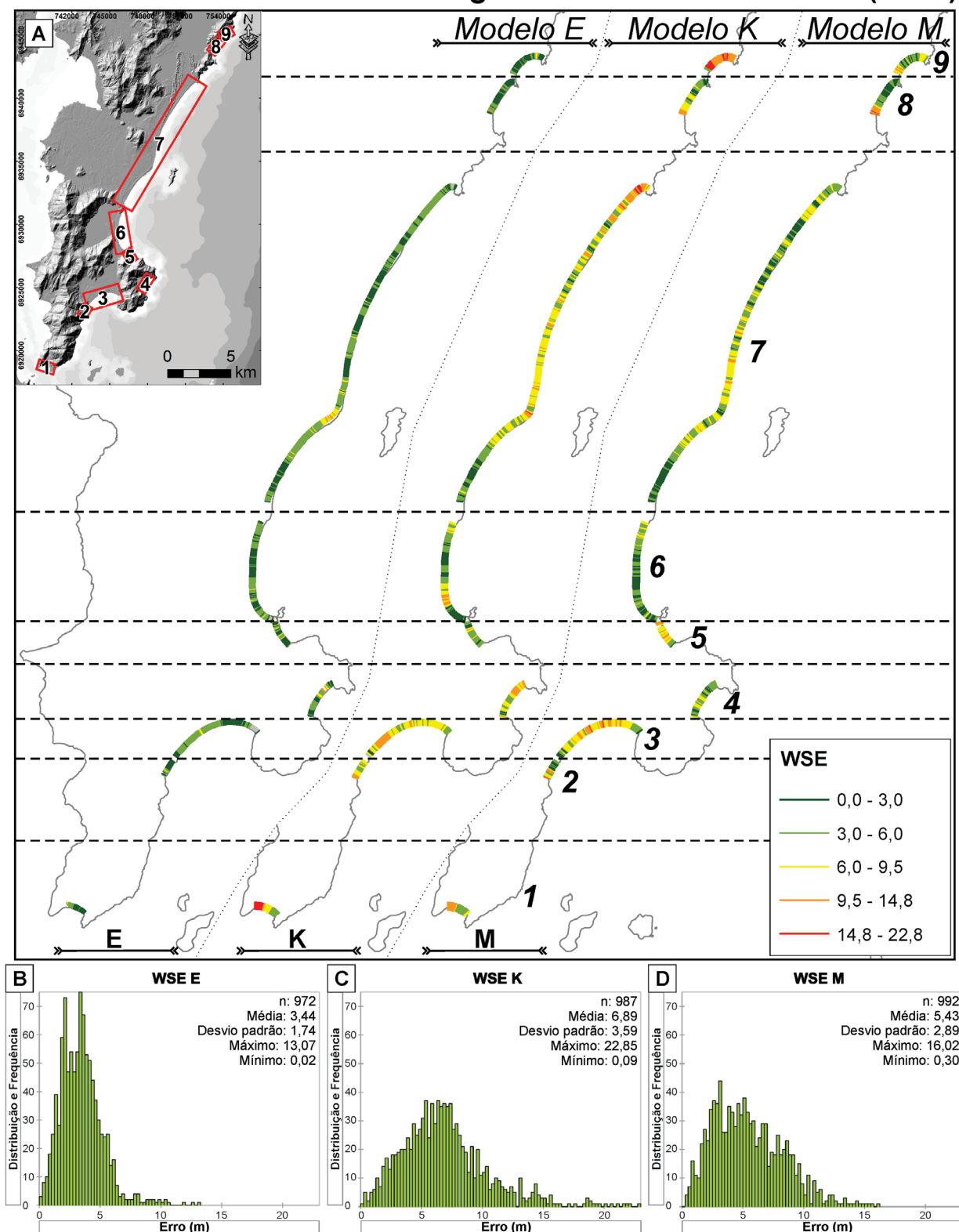


Figura 3. (A) Distribuição dos valores de erro padrão de estimativa (*standard error of estimate* – WSE) para os modelos E, K e M ao longo dos nove arcos praiais. (B, C e D) Histogramas com os valores de WSE em número, média, desvio padrão, valores máximo e mínimo dos modelos E, K e M.

Comparação entre modelos da variação da linha de costa

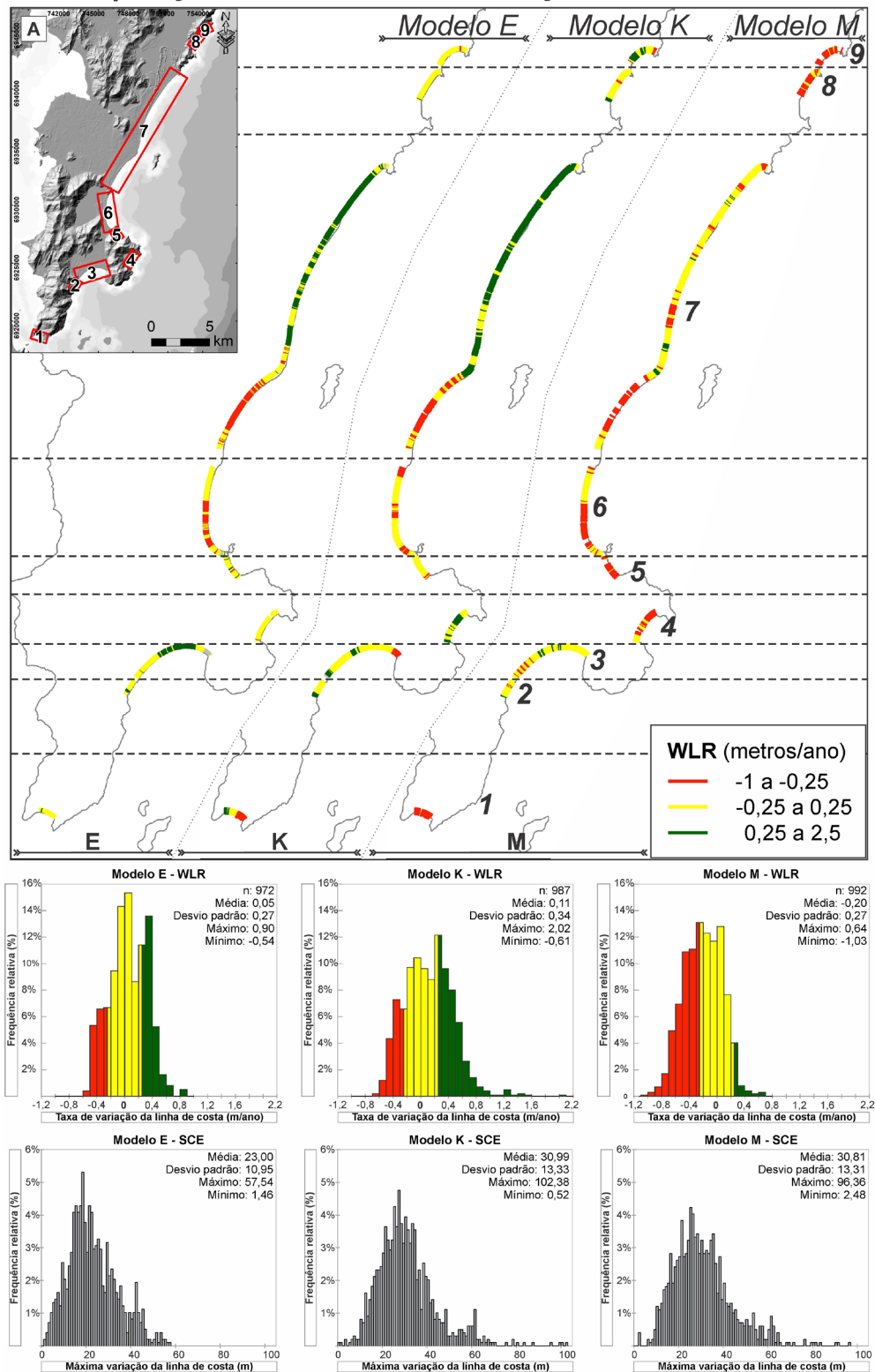
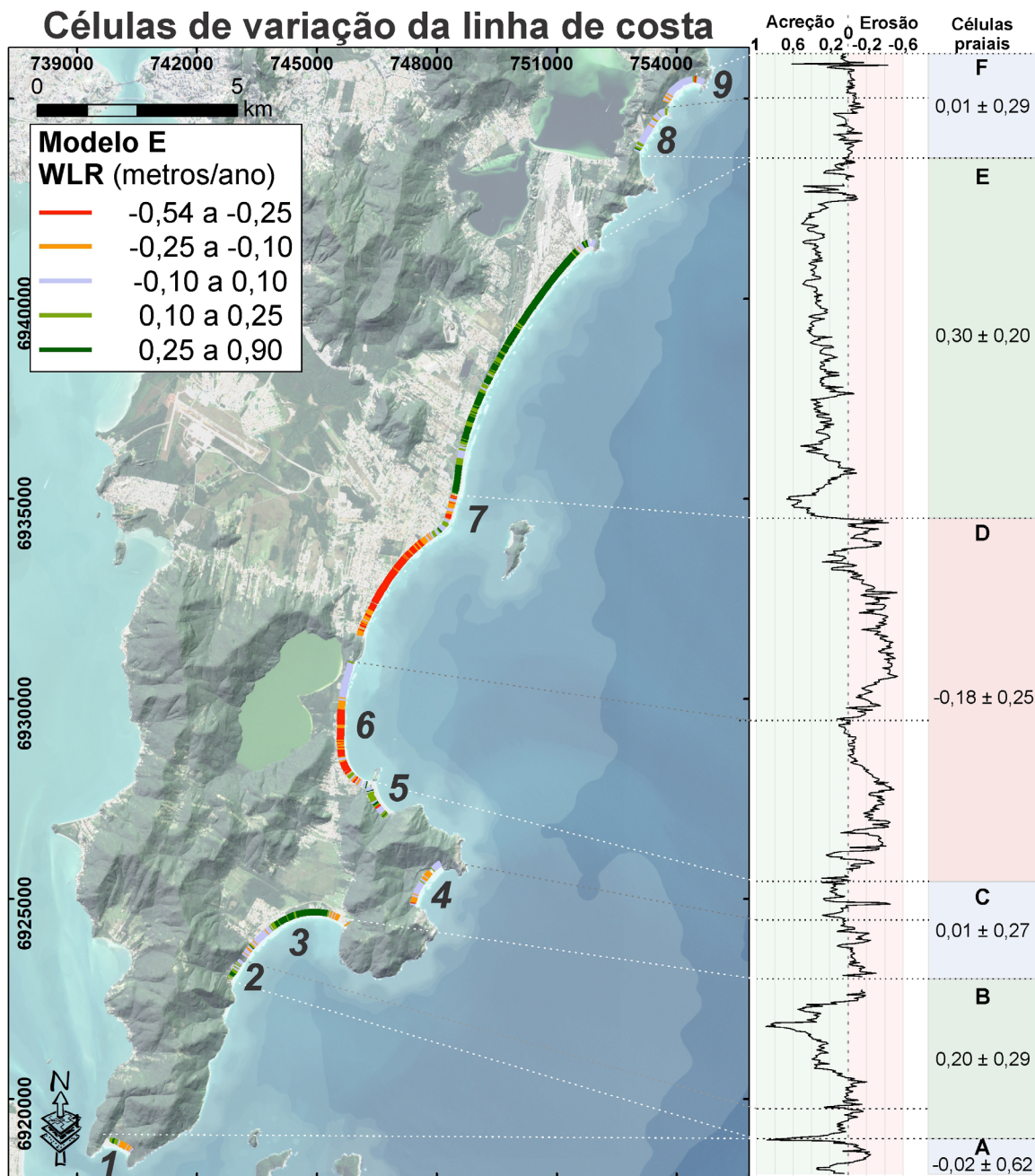


Figura 4. Distribuição da taxa de variação da linha de costa (*weighted linear regression* — WLR) para os modelos E, K e M indicando áreas com suscetibilidade a erosão (em vermelho), estabilidade (em amarelo) e acreção (em verde) ao longo dos nove arcos praias. Variabilidade dos modelos E, K e M representada pelas estatísticas *weighted linear regression* (WLR) e *shoreline change envelope* (SCE).



Células praias estáveis: A: Naufragados, C: Lagoinha do Leste-Matadeiro, F: Mole-Galheta; células com acreção: B: Solidão-Açores-Pântano do Sul, E: Campeche-Joaquina; célula com erosão: D: Armação-Caldeirão-Morro das Pedras.

Figura 5. Distribuição das taxas de variação da linha de costa (*weighted linear regression* – *WLR*) do modelo E ao longo dos nove arcos praias. Os valores médios de *weighted linear regression* – *WLR* e de *standard error of estimate* – *WSE* foram agrupados em seis setores ou células praias.

de bolso ou parabólica e são expostos à ação de ondas e ventos, principalmente do quadrante leste, sul e sudeste (Figura 5).

Os setores B e E têm progradação da linha de costa com média de acreção de $0,20 \pm 0,29$ m/ano e $0,30 \pm 0,20$ m/ano, respectivamente. Os arcos praias dos setores B (Açores-Pântano do Sul) e E (Campeche-Joaquina) possuem forma

parabólica ou retilínea, são parcialmente protegidos da ação de ondas incidentes do quadrante sul e sudeste e são expostas à ação de ondas do quadrante leste. A proteção ao clima de ondas predominante funciona como armadilha para os sedimentos costeiros que são depositados na praia e acumulados nos sistemas eólicos adjacentes.

O setor D apresenta o registro erosivo da área analisada com retrogradação da linha de costa a uma taxa média de $-0,18 \pm 0,25$ m/ano. Esta faixa costeira localizada nos arcos praias da Armação-Caldeirão e Morro das Pedras-Campeche é altamente vulnerável à ondulação do quadrante leste e parcialmente suscetível ao clima de ondas do quadrante nordeste e sudeste. Possui transporte de sedimentos condicionado pela fisiografia do embasamento e não possui fontes relevantes de reposição do estoque sedimentar próximas.

DISCUSSÃO

As mudanças costeiras de 1938 a 2016 na costa centro-sul da ISC apresentam variações setoriais, com células de acreção, erosão e áreas com pequenas mudanças que representam estabilidade.

As incertezas da análise associadas ao erro do tamanho de *pixel* (Ep), à raiz do erro quadrático médio (RMSE) e ao erro de vetorização (Ev) mostram que os valores de erro padrão da estimativa (*WSE*) obtidos para os modelos E, K e M são significativamente diferentes. O modelo E apresenta

menor *WSE* e melhor ajuste aos dados, mesmo com valores maiores de incertezas (It), pelo fato de a feição indicadora da linha de costa E (limite entre praia-duna) registrar variações da linha de costa de longo prazo sem a influência direta da variação diurna de maré. Isso se traduz em menor dispersão das taxas de variação da linha de costa (Figura 4) e maior precisão nas estimativas da regressão linear ponderada (*WLR*) em relação aos modelos K e M. O modelo K foi o que apresentou a maior amplitude de variação em razão da feição indicadora da linha de costa K (limite entre a área seca-molhada) ser submetida a constantes variações cíclicas da maré. Apesar de apresentar amplitude de variação menor que o modelo K, o modelo M (linha de água instantânea) possui menor correspondência às feições geológicas (Fletcher et al., 2012). A identificação da feição indicadora da linha de costa M em fotografias aéreas históricas pode ser comprometida pela qualidade das fotografias aéreas analógicas e por fatores inerentes ao aerolevanteamento fotogramétrico, por exemplo, diferente resolução espacial e escala. Cada tipo de FILC produz um modelo que possui vantagens e desvantagens para a análise da variação da linha de costa (Tabela 3).

Tabela 3. Vantagens e desvantagens dos modelos E, K e M para a análise da variação da linha de costa.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
E	<ul style="list-style-type: none"> - A linha E é mais estável por sofrer menos influência de processos oscilatórios (Thieler e Danforth, 1994b; Ford, 2013). - Fácil identificação da feição indicadora de linha de costa E (Ford, 2013) pelo contraste observado no limite entre praia-duna. É possível identificar a linha E em locais onde as linhas K e M não são distinguíveis. - Adequado para análise de poucas séries temporais de dados (menor variabilidade) (Fletcher et al., 2012). - Indica processos de médio-longo prazo (Ford, 2013). 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é possível utilizar em costas com intervenção antrópica intensa. - Suscetível a variações bióticas e climáticas que controlam o desenvolvimento da vegetação (Ford, 2013).
K	<ul style="list-style-type: none"> - Indicador (limite entre a área seca-molhada) mais utilizado para a análise da variação da linha de costa (Araújo et al., 2009; Klein et al., 2016a). - Utilização em costas naturais ou antropizadas. - É controlado por processos unicamente físicos (marés, ondas, ventos e sedimentação). - Fácil identificação da feição indicadora de linha de costa K (Crowell et al., 1991). 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificação subjetiva da feição indicadora de linha de costa K (limite entre a área seca-molhada pode variar de um analista para outro dependendo do contraste da fotografia aérea). - Maior variabilidade. - Indica processos de curto-médio prazo. - Sujeita a variações sazonais (Thieler e Danforth, 1994b). - Do ponto de vista geológico, a linha K pode não ser o melhor indicador (Thieler e Danforth, 1994a). - Necessita da mensuração das variações sazonais (Fletcher et al., 2012), pois pode ser deslocada pela condição climática (Thieler e Danforth, 1994b).
M	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicável em linhas de costa antropizadas. - Recomendada para imagens de satélite (com baixa resolução espacial). - Alto contraste para a definição da feição indicadora de linha de costa M (linha de água instantânea). 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta variabilidade. - Sujeita a variações morfológicas da praia. - Sujeita a variações sazonais. - Necessita da mensuração das variações sazonais.

A acreção da linha de costa predomina em relação à erosão, para a área estudada. Os registros de acreção ocorrem nas praias de Açores-Pântano do Sul e Campeche-Joaquina. São de fácil identificação, pois são adjacentes a dois campos de dunas ativos (Figura 5). Essas áreas possuem taxa de acreção de 20 a 30 cm ao ano e são parcialmente protegidas de ondas do quadrante sul e sudeste por ilhas costeiras. Essa tendência pode ser explicada pelo progressivo estoque de sedimentos nas porções a norte dos arcos praias por ação de correntes de deriva litorânea (Vos et al., 2019), pelo retrabalhamento de sedimentos previamente depositados (Tanaka, 2010) e por mudanças relacionadas ao clima de ondas (Silva et al., 2016).

Identificou-se estabilidade nas praias de Naufragados, Lagoinha do Leste, Matadeiro, Mole e Galheta. Essas praias possuem taxa média de variação da linha de costa entre -0,02 e 0,01 m/ano e possuem forma de bolso, com pequena extensão em relação às outras praias analisadas. Essas praias possuem pouca ocupação antrópica e têm características naturais preservadas.

O registro erosivo ocorre nas praias de Armação, Caldeirão, Morro das Pedras e Campeche em célula limitada pelo embasamento e que possui taxa de erosão de -0,18 m/ano. Essas praias possuem maior exposição ao clima de ondas leste e nordeste, em relação a outras áreas (Figura 5). O processo erosivo nestas praias parcialmente protegidas da ação direta de ressacas pode ser explicado pelo modelo conceitual de Harley et al. (2011), que descreve o mecanismo de rotação da linha de costa. Enquanto ocorre erosão na porção sul de determinado arco praias submetido a ondas de tempestade dos quadrantes sul e sudeste, verifica-se acreção na porção norte desse arco. Esse mecanismo está diretamente ligado ao clima de ondas e ao transporte de sedimentos por correntes de deriva litorânea, que são intensificados em eventos de tempestade. O padrão espacial de erosão é o mesmo para as praias do norte da ilha de Santa Catarina, analisadas por Klein et al. (2016a): enquanto na porção sul dos arcos praias predomina o registro de erosão, na porção norte predomina o registro de acreção, conforme modelo de Harley et al. (2011). O trabalho de Marins (2020) aponta para a predominância do processo de erosão nas praias da porção sul da ilha de Santa Catarina, contudo essa interpretação é pautada em valores da variação da linha de costa obtidos por um modelo gerado com base na FILC E como linha de base. Essa escolha resultou em transectos posicionados diagonalmente sobre linhas de costa e valores da taxa de variação da linha de costa que podem ser considerados superestimados, conforme conceitua Danforth e Thieler (1992). Danforth e Thieler (1992) explicam que a linha de base deve estar posicionada de maneira paralela às linhas de costa analisadas.

Praias que possuem benfeitorias sobre os sistemas eólicos são as mais afetadas pela erosão visto que o estoque sedimentar é aprisionado e impossibilita a migração de sedimentos, que ocorre em ciclos sazonais de erosão e acreção (Krueger,

2011; Fletcher et al., 2012; Romine e Fletcher, 2013). As praias que possuem maior ocupação antrópica próxima à linha de costa são as que foram classificadas na célula praias erosiva: Armação, Caldeirão, Morro das Pedras e Campeche. A praia da Armação foi uma das mais afetadas pelo processo erosivo em 2010, e como medida emergencial para proteger casas do avanço do mar foi construído muro de contenção. Aproximadamente 500 m da faixa de praia foram perdidos, e as praias localizadas a norte, como Caldeirão, Morro das Pedras e Campeche, têm sofrido processos erosivos (Figura 6). Os processos erosivos que ocorrem nas praias da Armação, Caldeirão, Morro das Pedras e Campeche podem provocar, já na próxima década, a destruição de benfeitorias ao longo da linha de costa e culminar na salinização da Lagoa do Peri, maior manancial de água doce da ISC. O cordão arenoso responsável por separar o Oceano Atlântico da Lagoa do Peri tem sido erodido progressivamente e pode ficar suscetível à intrusão da cunha salina em direção à lagoa.

Parte da erosão é explicada por processos naturais. A influência de ressacas potencializa a erosão e o transporte longitudinal de sedimentos que resultam nas características identificadas em cada célula praias, que possuem suas características ilustradas na Figura 6.

CONCLUSÃO

Mapearam-se 23,6 km de linha de costa, com dados relativos a seis séries multitemporais, que representam mudanças costeiras ocorridas em 78 anos. No total, analisaram-se nove arcos praias: Naufragados, Solidão, Açores-Pântano do Sul, Lagoinha do Leste, Matadeiro, Armação-Caldeirão, Morro das Pedras-Campeche-Joaquina, Mole e Galheta.

O cálculo estatístico de variação da linha de costa foi executado com base em três modelos espaciais que representam as feições indicadoras de linha de costa E (linha que marca o início da duna frontal, geralmente pela presença de vegetação), linha K (que divide a porção seca e molhada da praia) e linha M (que marca a presença instantânea de água), que totalizam 2.970 transectos. Os modelos construídos no DSAS possuem boa aderência aos dados e são eficientes na reprodução das variações da linha de costa de cada modelo.

A comparação entre os modelos permitiu a distinção entre os produtos gerados por meio de diferentes marcadores da linha de costa (FILC). O método desenvolvido nesta pesquisa trouxe luz a essa variedade de FILC, principalmente em relação às linhas E, K e M, mostrando que a linha E é a FILC com maior homogeneidade.

Os resultados indicam nove células da variação da linha de costa, sendo duas células de acreção (Açores-Pântano do Sul e Campeche-Joaquina), uma erosiva (Armação-Caldeirão e Morro das Pedras-Campeche) e três células estáveis

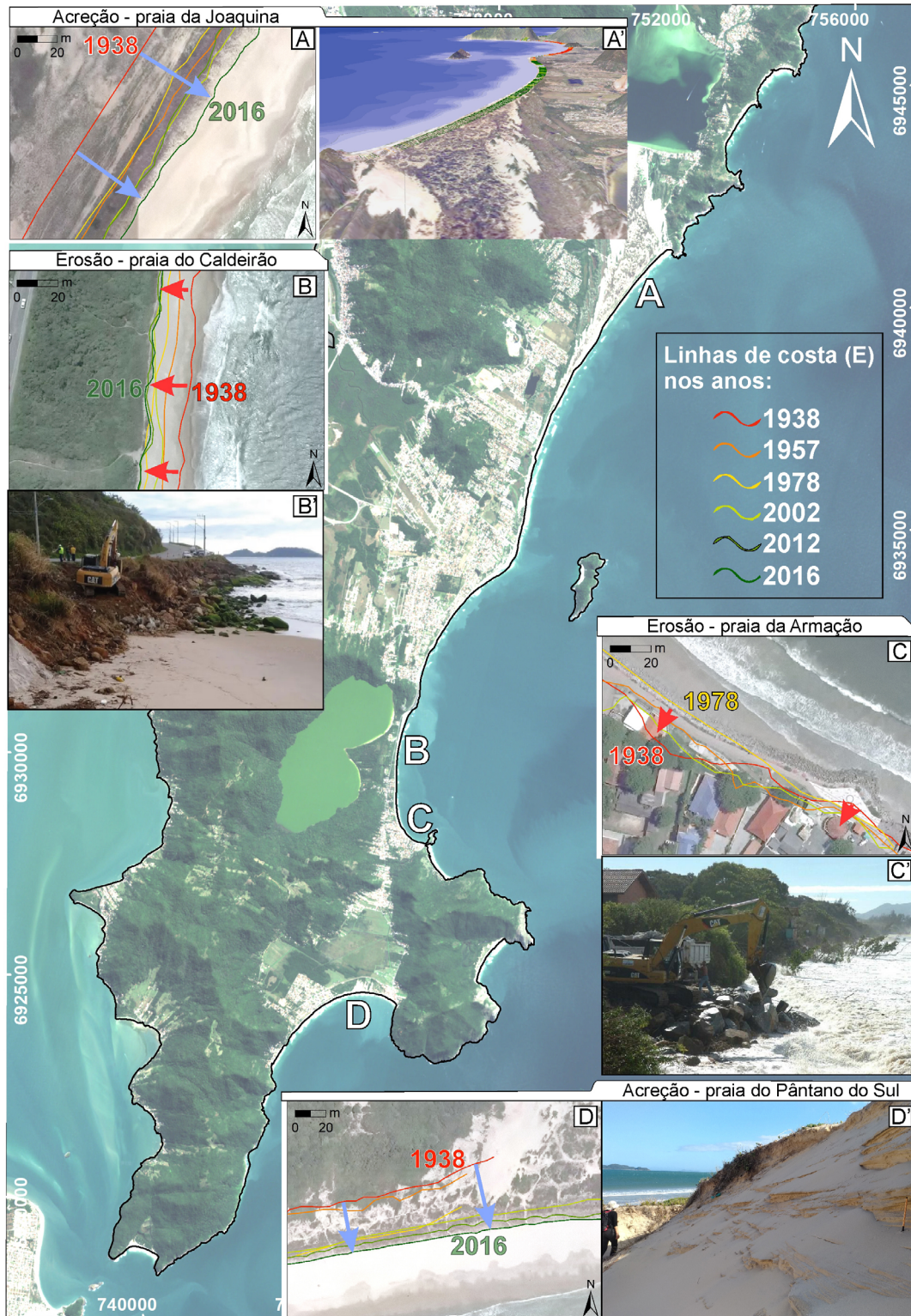


Figura 6. (A) Recorte da fotografia aérea do arco praial Campeche-Joaquina em 2016 com a indicação de acreção associada ao campo de dunas ativo; (B) recorte da fotografia aérea do arco praial Armação-Caldeirão (2016) com a indicação de erosão no ano de 2017; (C) registro do avanço do mar no ano de 2010 na praia da Armação; (D) sistema eólico localizado no arco praial Açores-Pântano do Sul com estruturas cruzadas ortogonais à linha de costa, formadas pelo processo de acreção posterior ao ano de 1938.

(Naufragados, Solidão, Lagoinha do Leste, Matadeiro, Mole e Galheta). Essas células são mais bem identificadas pelo modelo E, que possui mais acurácia e homogeneidade dos resultados gerados. Esse comportamento pode ser visualizado pela comparação dos modelos e da análise do erro: o modelo E apresenta taxa média de variação da linha de costa de $0,05 \pm 0,12$ m/ano, com dispersão de 0,27 m, enquanto a média de variação do modelo K é $0,12 \pm 0,25$ m/ano, com dispersão de 0,35 m, e a média obtida no modelo M é de $-0,20 \pm 0,20$ m/ano, com dispersão de 0,28 m.

A variação da linha de costa parece ser controlada principalmente pelo clima de ondas incidente, pela disponibilidade e transporte de sedimentos e pela ocupação antrópica. Este último fator é claramente um potencializador dos danos causados por grandes eventos de tempestade que têm sido registrados com maior intensidade nas últimas décadas. Os eventos erosivos possuem padrão oscilatório com picos, de acordo com registros bibliográficos, a cada 10 anos, aproximadamente.

Vale destacar que todas as praias classificadas como estáveis possuem pouca ou nenhuma intervenção antrópica. De forma semelhante, as praias classificadas como acrescidas preservam as características naturais e não são ocupadas, salvo o caso da praia do Pântano do Sul. As praias com maior ocupação antrópica são as que apresentam maiores taxas de erosão da linha de costa.

Recomenda-se a realização de trabalhos futuros que considerem imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada (ARP) ou por satélites de alta resolução espacial para o cálculo das variações de curto-médio prazo. Estes produtos obtidos por sensores remotos possuem dados referentes à data e ao horário de aquisição e podem ser utilizados em conjunto com os dados oceanográficos, que exercem grande influência no padrão de variação da linha de costa. Trabalhos que quantifiquem e correlacionem variáveis climáticas em relação à variação da linha de costa são necessários para o entendimento adequado dos processos que moldam a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos nas praias analisadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) o suporte científico do projeto e à Secretaria de Coordenação e Governança do Patrimônio da União (SPU) o suporte com infraestrutura, disponibilização das fotografias aéreas históricas e apoio com as bolsas de extensão para os autores deste trabalho. Agradecem também à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE), ao Instituto do Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF) e à empresa Planet a disponibilização dos produtos obtidos por sensores remotos de alta resolução espacial.

REFERÊNCIAS

- Alberico, I., Amato, V., Aucelli, P. P. C., D'Argenio, B., Di Paola, G., Pappone, G. (2012). Historical shoreline change of the Sele Plain (Southern Italy): The 1870–2009 time window. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1638-1647. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00197.1>
- Anders, F. J., Byrnes, M. R. (1991). Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59(1), 17-26.
- Araújo, C. E. S. (2020). Análise das flutuações do nível do mar no litoral de Santa Catarina. *Revista Agropecuária Catarinense*, 33(1), 61-67. <https://doi.org/10.52945/rac.v33i1.535>
- Araújo, C. E. S., Franco, D., Melo Filho, E., Pimenta, F. (2003). Wave regime characteristics of southern Brazilian coast. *6º International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*. Paper n. 97. Colombo, Sri Lanka: COPEDEC, 15 p.
- Araújo, R. S., Silva, G. V., Freitas, D., Klein, A. H. F. (2009). Georreferenciamento de fotografias aéreas e análise da variação da linha de costa. In: J. Alcántara-Cario, I. D. Correa, F. Isla, M. Alvarado, A. H. F. Klein, J. A. Cabrera, eds. *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*. Madrid: Servicio de Publicaciones del Programa Iberoamericano de Ciencias y Tecnología para el Desarrollo, p. 123-138.
- Backes, B. (2017). População de Florianópolis quase triplicou no Réveillon, aponta Casan. *RCN*, 2017. Disponível em: <http://rcnonline.com.br/popula%C3%A7%C3%A3o-de-florian%C3%B3polis-quase-triplicou-no-r%C3%A9veillon-aponta-casan-1.1955463>. Acesso em: 7 dez. 2020.
- Basei, M. A. S., Campos Neto, M. C., Castro, N. A., Nutman, A. P., Wemmer, K., Yamamoto, M. T., Hueck, M., Osako, L., Siga, O., Passarelli, C. R. (2011). Tectonic evolution of the Brusque Group, Dom Feliciano Belt, Santa Catarina, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 324-350. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.016>
- Bird, E. C. F. (1985). *Coastline changes*. Nova York: Wiley and Sons, 219 p.
- Bird, E. C. F. (1987). The modern prevalence of beach erosion. *Marine Pollution Bulletin*, 18(4), 151-157. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(87\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0025-326X(87)90238-4)
- Boak, E. H., Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 2005(214), 688-703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>

- Brasil. (1984). Decreto nº 89.817. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm. Acesso em: 12 fev. 2021.
- Castilhos, J. A. (1995). *Estudo evolutivo, sedimentológico e morfodinâmico da planície costeira e praia da Armação - Ilha de Santa Catarina, SC*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Geografia, Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/76302>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., Buckley, M. K. (1991). Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 839-852. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4297899>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Dalbosco, A. L. P. (2013). *Análise histórica da linha de costa e dos padrões hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos da Praia da Armação, Ilha de Santa Catarina/SC*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123014>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Danforth, W. W., Thieler, E. R. (1992). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) user's guide: version 1.0* (No. 92-355). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr92355>
- Dillenburg, S. R., Hesp, P. A. (2009). *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Cham: Springer, 380 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9>
- Diretoria de Serviços Cartográficos (DSG). (2016). *Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais*. ET-CQDG. Brasília: DSG. Disponível em: http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf. Acesso em: 12 fev. 2021.
- Dolan, R., Anders, F., Kimball, S. (1985). *Coastal erosion and accretion, in National Atlas of the United States of America*. Reston: U.S. Geological Survey, 1 sheet, scale 1:7,500,000.
- Dolan, R., Hayden, B. P., May, P., May, S. (1980). The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48, 22-29.
- ESA Copernicus Sentinel Data. (2018). *Composição 4-3-2 do Satélite Sentinel-2*. Disponível em: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso em: 23 out. 2018.
- Estevam, C. N. (2019). *Análise espacial do registro clástico Quaternário da Planície Costeira do estado de Santa Catarina, Brasil*. TCC (Graduação em Geologia). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Fletcher, C. H., Romine, B. M., Genz, A. S., Barbee, M. M., Dyer, M., Anderson, T. R., Richmond, B. M. (2012). *National assessment of shoreline change: Historical shoreline change in the Hawaiian Islands*. Open-File Report 2011-1051. USGS.
- Ford, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high-resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135, 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.027>
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., Ranasinghe, R. (2011). A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4). <https://doi.org/10.1029/2011JF001989>
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., Farris, A. S. (2018). *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide (No. 2018-1179)*. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- Horn Filho, N. O. (2006). Ilha de Santa Catarina. In: D. Muehe (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 476 p.
- Horn Filho, N. O., Leal, P. C. (2017). *Geologia das 117 praias arenosas da ilha de Santa Catarina, Brasil*. Florianópolis: Edições do Bosque, v. 1, 220 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/178811>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Horn Filho, N. O., Schmidt, A. D., Abreu, J. G. N., Estevam, C. N., Araújo, R. S. (2018). Panorama da Erosão Costeira no Brasil - Santa Catarina. In: D. Muehe (org.). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, v. 1, 759 p.
- Hwang, D. J. (1981). *Beach changes on Oahu as revealed by aerial photographs*. Coastal Zone Management Program, Technical Supplement 22. Honolulu: Department of Planning and Economic Development, 146 p. Disponível em: https://onsearch.library.uwa.edu.au/permalink/61UWA_INST/1iju3hj/alma9979176402101. Acesso em: 15 out. 2021.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2015). *Resolução 01/2015*. Disponível em: geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf. Acesso em: 29 nov. 2018.

- Kabuth, A. K., Kroon, A., Pedersen, J. B. (2014). Multidecadal shoreline changes in Denmark. *Journal of Coastal Research*, 30(4), 714-728. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00139.1>
- Klein, A. H. F., Menezes, J. T., Diehl, F. L., Abreu, J. G. N., Polette, M., Sperb, R. M., Sperb, R. C. (2006). Santa Catarina. In: D. Muehe (org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 476 p.
- Klein, A. H. F., Prado, M. F. V., Dalinghaus, C., Camargo, J. M. (2016a). *Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudo de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno*. Final Report. Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 206 p. Disponível em: https://smcbrasil.paginas.ufsc.br/files/2018/03/Klein_et_al_2016_Metodologia_para_quantifica%C3%A7%C3%A3o_de_perigos_costeiros-l.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.
- Klein, A. H. F., Short, A. D., Bonetti, J. (2016b). Santa Catarina beach systems. In: A. D. Short, A. H. F. Klein (org.). *Brazilian Beach Systems*. Springer Coastal Research Library, p. 465-506. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9>
- Krueger, J. (2011). *Análise dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos dos eventos de ressaca, ocorridos entre janeiro de 2001 a dezembro de 2010, no Estado de Santa Catarina*. Monografia (Graduação em Oceanografia). Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí.
- Marins, P. C. O. (2020). *Análise têmporo-espacial da urbanização sobre as unidades geológicas da Planície Costeira e relação com a erosão costeira na costa oceânica da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/219447>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Monteiro, M. A., Furtado, S. M. A. (1995). O clima do trecho Florianópolis – Porto Alegre: uma abordagem dinâmica. *Geosul*, 19(20), 116-133.
- Morton, R. A., Miller, T., Moore, L. (2005). Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: a summary of recent shoreline comparisons and analyses. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 704-709. <https://doi.org/10.2112/04-0230.1>
- Muehe, D. (2018). *Panorama da erosão costeira no Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 759 p.
- Nebel, S. H., Trembanis, A. C., Barber, D. C. (2012). Shoreline analysis and barrier island dynamics: decadal scale patterns from Cedar Island, Virginia. *Journal of Coastal Research*, 28(2), 332-341. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00144.1>
- Paraizo, L. (2019). Florianópolis ultrapassa marca de meio milhão de habitantes. *NSC Total*. Disponível em: <https://www.nsctotal.com.br/noticias/florianopolis-ultrapassa-marca-de-meio-milhao-de-habitantes>. Acesso em: 7 dez. 2020.
- Rocchini, D., Di Rita, A. (2005). Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, 25(2), 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.03.002>
- Romine, B. M., Fletcher, C. H. (2013). A summary of historical shoreline changes on beaches of Kauai, Oahu, and Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 29(3), 605-614. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00202.1>
- Romine, B. M., Fletcher, C. H., Frazer, L. N., Genz, A. S., Barbee, M. M., Lim, S. C. (2009). Historical shoreline change, southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates. *Journal of Coastal Research*, 25(6), 1236-1253. <https://doi.org/10.2112/08-1070.1>
- Ruy, R. S., Tommaselli, A. M. G., Reis, T. T., Galo, M., Hasegawa, J. K., Imai, N. N., Camargo, P. O. Junior, J. P. M. (2007). Sistema aerotransportado leve de aquisição de imagens digitais - SAAPI. *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis: INPE, p. 1329-1335. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.41/doc/1329-1335.pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Schmidt, A. D., Horn Filho, N. O., Estevam, C. N. (2013). Estratégias adotadas para conter a erosão costeira no litoral de Santa Catarina, Brasil. *VII Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Maputo, p. 1-12.
- Secretaria de Coordenação e Governança do Patrimônio da União (SPU). (2019). *Metodologia de Conversão de Dados Geoespaciais da SPU, Capítulo Georreferenciamento*. Brasília: Ministério do Planejamento, SPU, 24 p. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/patrimonio-da-uniao/geoinformacao/normas-e-padres-1/MethodologiaDeConversodeDadosCaptuloGeorreferenciamentov2.2.pdf>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDE). (2016). *Hidrografia e limites geográficos*. Florianópolis: Diretoria de Estatística e de Cartografia (DEGE).

- Silva, G. V., Muler, M., Prado, M. F., Short, A. D., Klein, A. H. F., Toldo, E. E. (2016). Shoreline change analysis and insight into the sediment transport path along Santa Catarina Island north shore, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 32(4), 863-874. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00164.1>
- Silva, G. V., Toldo Jr., E. E., Klein, A. H. F., Short, A. D. (2018). The influence of wave-, wind-and tide-forced currents on headland sand bypassing—Study case: Santa Catarina Island north shore, Brazil. *Geomorphology*, 312, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.026>
- Simó, D. H., Horn Filho, N. O. (2004). Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Gravel*, 2, 93-103. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gravel/2/Gravel_2_09.pdf. Acesso em: 15 out. 2021.
- Souza, J. M., Vieira, V. F., Trabaquini, K., Dortzbach, D., Vieira, E. (2017). Qualidade geométrica das ortofotos e modelo digital de terreno do levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina: Estudo de caso: Microbacia Alto Cubatão. *XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Santos: INPE.
- Tanaka, A. P. B. (2010). *Sedimentologia, cronologia e dinâmica progradacional das planícies costeiras de Campos Verdes e Ji (Laguna, SC)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-08012011-200134/pt-br.php>. Acesso em: 21 out. 2021.
- Thieler, E. R., Danforth, W. W. (1994a). Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 549-563. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4298252>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Thieler, E. R., Danforth, W. W. (1994b). Historical shoreline mapping (II): application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 600-620. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/4298256>. Acesso em: 15 out 2021.
- Tomazzoli, E. R., Pellerin, J. R. G. M., Horn Filho, N. O. (2018). Geologia da Ilha de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil. *Geociências*, 37(4), 715-731. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i4.11656>
- Truccolo, E. C., Franco, D., Schettini, C. A. F. (2004). The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 39, S47-S52. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25741633>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Valiela, I. (2006). *Global coastal change*. Malden: Blackwell, 376 p.
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160-174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Zhang, K., Douglas, B. C., Leatherman, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64(1-2), 41. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024690.32682.48>