



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Marcos Felipe Tomasi

**Estudo do comportamento da linha de costa das praias do entorno da
desembocadura da baía da Babitonga através da análise de imagens de
satélite**

Florianópolis

2024

Marcos Felipe Tomasi

**Estudo do comportamento da linha de costa das praias do entorno da
desembocadura da baía da Babitonga através da análise de imagens de
satélite**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Orientador: Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.

Coorientador: João Thadeu de Menezes, Dr.

Florianópolis

2024

Tomasi, Marcos Felipe

Estudos do comportamento da linha de costa das praias do entorno da desembocadura da baía da Babitonga através da análise de imagens de satélite / Marcos Felipe Tomasi; orientador, Antonio Henrique da Fontoura Klein, Coorientador, João Thadeu de Menezes, 2024.

62.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. CASSIE. 3; linha d'água. 4. Setorização de praias. 5. Pulsos de areia. I. Klein, Antonio Henrique da Fontoura. II. Menezes, João Thadeu de. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Marcos Felipe Tomasi

Estudo do comportamento da linha de costa das praias do entorno da desembocadura da baía da Babitonga através da análise de imagens de satélite

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 22 de março de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Luís Pedro Melo de Almeida, Dr.
CoLAB+ATLANTIC

Prof. Pedro de Souza Pereira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Prof. Pedro de Souza Pereira, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2024.

Àquele que há de morrer e renascer.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Liliane e Marcos, sem vocês nada seria possível. Agradeço à Ivanna, Marcelo, Pedro e Arthur pelo acolhimento e apoio neste período. Agradeço ao Antonio Klein pela oportunidade, auxílio e confiança. Agradeço à Mariane, Laís e Mario pelo apoio e conselhos acadêmicos. Agradeço ao Bruce, Toco, Letícia, Giulia, Flora, Fruto, Vaca, Pamonha, e Stallone, não parece, mas vocês fizeram parte disto.

RESUMO

A análise dos repositórios de imagens de satélite públicos tem sido cada vez mais utilizado para a obtenção da posição da linha d'água como indicador da posição da linha de costa, possibilitando o estudo de seu comportamento em larga escala espaço-temporal. Neste estudo, para contribuir com a compreensão do comportamento e evolução da linha de costa dos sistemas praias adjacentes à baía da Babitonga, SC, Brasil, a plataforma CASSIE foi utilizada para gerar ~40 anos de dados de posição da linha de água derivadas de imagens de satélite. O comportamento e a evolução da linha de costa desses sistemas foram investigados através da interpretação do diagrama de Hovmoller, da setorização dos sistemas praias e da taxa de alteração da posição linha de costa em cada setor identificado. O diagrama de Hovmoller foi elaborado a partir da posição média anual da linha de costa. A setorização dos sistemas de praia foi feita com a interpretação do diagrama de Hovmoller aliada à análise de Clusterização Hierárquica. A taxa de variação da linha de costa de cada sector foi realizada para os dados médios dos transectos que compõem cada setor. Os resultados revelaram a ocorrência de pulsos sedimentares nas praias da Enseada e do Forte, que tem origem nos promontórios rochosos, e se propagam ao longo da praia da Enseada e no sistema praias do Forte-Capri; também foram identificadas tendências erosivas significativas no limite da Ponta do Sumidouro com a praia do Forte, no segundo setor do sistema praia do Forte-Capri, com Taxa de da Regressão Linear (LRR) de -4. 11 m/ano (IC = $\pm 0,59$ m/ano), no segundo e terceiro setores do sistema praias Pontal-Itapoá com LRR de -1,61 m/ano (IC = $\pm 0,31$ m/ano) e -0,90 m/ano (IC = $\pm 0,18$ m/ano), respectivamente. O restante dos sectores pertencentes a ambientes praias foram classificados como estáveis, sem tendências de progradação/retrogradação da linha de costa.

Palavras-chave: CASSIE, linha d'água, setorização de praias, taxa de mudança, pulsos de areia.

ABSTRACT

The waterline position derived from publicly available satellite imagery has been a novel and increasingly used method to acquire high spatial-temporal scale and with enough resolution data to study shoreline behavior. In this study, to enhance understanding of the shoreline behavior and evolution of the beach systems adjacent to Babitonga bay inlet, SC, Brazil, the CASSIE platform was used to generate ~40 years of satellite-derived waterline position data. The shoreline behavior and evolution of these systems were investigated through Hovmoller diagram interpretation, beach systems sectorization and shoreline change rate of the identified sectors. The Hovmoller diagram was drawn up using the annual average shoreline position. The beach systems sectorization was made up with the Hovmoller diagram interpretation allied to Hierarchical Clustering analysis. The shoreline change rate of each sector was conducted for the average transect data that make up the sectors. The results revealed the occurrence of sedimentary pulses on the Enseada and Forte beaches, which starts at headland and propagates along the Enseada beach and Forte-Capri beach system; Also, was identified significant erosion trends on the boundary of Ponta do Sumidouro and Forte beach, at second sector of Forte-Capri beach system, with Linear Regression Rate (LRR) of -4.11 m/year (CI = ± 0.59 m/year), at the second and third sector of Pontal-Itapoá beach system with LRR of -1.61 m/year (CI = ± 0.31 m/year) and -0.90 m/year (CI = ± 0.18 m/year), respectively. The remaining sectors embodying beach environments were classified as stable state.

Keywords: CASSIE, waterline, beach sectorization, change rate, sand pulse, headland bypass.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	ÁREA DE ESTUDO	12
2	OBJETIVOS.....	16
3	COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA NAS PRAIAS ADJACENTES À DESEMBOCADURA DE BAÍA COM BASE NA ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITES PÚBLICAS	17
3.1	ABSTRACT	17
3.2	INTRODUCTION.....	18
3.3	METHODS	20
3.4	RESULTS	23
3.4.1	Enseada-Itaguaçu beach system.....	23
3.4.2	Forte-Capri beach system	26
3.4.3	Pontal-Itapoá beach system.....	28
3.5	DISCUSSION.....	32
3.6	CONCLUSION	39
4	DISCUSSÃO.....	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48
	ANEXOS	55

1 INTRODUÇÃO

Dados sobre a posição da linha de costa são frequentemente utilizados em estudos para quantificar a erosão/deposição de sedimentos em ambientes praias (Hanson, 1989; Dabees e Kamphuis, 1998; Ranasinghe *et al.*, 2004; Short e Trembanis, 2004; Boak e Turner, 2005; Hanslow, 2007; Hapke *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Burningham e French, 2017; Ribeiro, 2017; Luijendijk *et al.*, 2018; Mentaschi *et al.*, 2018; Vousdoukas *et al.*, 2020; Bishop-Taylor *et al.*, 2021; Valverde, 2023). Estes dados são também utilizados para identificar e descrever diferentes processos costeiros, como a transposição sedimentar através de promontórios rochosos (Silva *et al.*, 2016, 2021), os impactos de tempestades costeiras (Fenster e Dominguez, 2022) e a propagação de grandes ondas de acreção sedimentar (Warrick *et al.*, 2023).

A posição da linha de costa pode ser inferida através da análise de mapas, cartas náuticas, fotografias aéreas, levantamentos topográficos, LIDAR e monitoramento por vídeo (Boak e Turner, 2005). Apesar da diversidade de métodos para a obtenção da posição da linha de costa, menos de 1% das praias do globo são monitoradas com resolução temporal e espacial suficiente para se descrever os processos que envolvem estes ambientes, especialmente em grandes escalas espaciais e temporais (Vitousek *et al.*, 2023). Dados da posição da linha d'água derivadas de imagens de satélite tem sido utilizado como indicador da posição da linha de costa para preencher esta lacuna (*Satellite Derived Shoreline - SDS*), fornecendo dados com resolução espacial/temporal de 1-30 m/1-15 dias e precisão de ~5-15 m, abrangendo períodos de 1984 até o presente (Hagenaars *et al.*, 2018; Luijendijk *et al.*, 2018; Vos, Harley, *et al.*, 2019, 2023; Vos, Splinter, *et al.*, 2019, 2023; Almeida *et al.*, 2021; Castelle *et al.*, 2022; Vitousek *et al.*, 2023).

Vitousek *et al.* (2023) fizeram uma revisão dos métodos de SDS. De acordo com os autores, o passo principal e comum entre os métodos é o uso de índices, como a classificação dos pixels da imagem em terra ou água usando o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). A natureza das imagens de satélite e a metodologia utilizada para classificar os pixels e delinear a linha de costa geram incertezas devido à resolução da imagem, ao georreferenciamento e ao co-registro, bem como ao ruído da imagem que dificulta a definição do limiar que distingue os pixels entre terra e água. Esta dificuldade resulta principalmente dos processos costeiros de alta frequência,

como o nível das marés, o *wave set-up* e o *swash* (Vitousek *et al.*, 2023; Vos, Splinter, *et al.*, 2023).

As metodologias utilizadas no SDS ainda não fornecem soluções para a maioria das incertezas relacionadas a estes processos costeiros de alta frequência (Vitousek *et al.*, 2023). Vos *et al.* (2020) propuseram um algoritmo que corrige a posição da linha de costa com base no nível do mar e na inclinação da praia. Outros autores utilizam médias espaciais e/ou temporais para reduzir a influência destes efeitos (Silva *et al.*, 2016; Luijendijk *et al.*, 2018; Castelle *et al.*, 2023). Apesar das incertezas inerentes ao SDS, Vos, Splinter *et al.* (2023) demonstram que o SDS em praias de micro-marés dominadas por ondas atinge uma precisão de ~10 m, sendo adequado para inferir suas variações em diferentes escalas temporais.

Almeida *et al.* (2021) desenvolveram o Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE), uma plataforma *open-source* alojada na rede mundial de computadores que utiliza a API do *Google Earth Engine* para extrair a linha d'água a partir de imagens dos satélites Landsat (*Surface Reflectance*) e Sentinel (*Top of Atmosphere*). O seu algoritmo calcula o NDWI para cada pixel da imagem e classifica-os como terra ou água em função do limiar fixado para o índice, sendo possível utilizar o algoritmo de Otsu (1979) para o classificá-los automaticamente. O SDS resultante do CASSIE atinge resolução de sub-pixel aplicando filtro Gaussiano 1-D. Embora a sua metodologia não aplique qualquer correção relativamente aos processos costeiros de alta frequência, Almeida *et al.* (2021), utilizando dados RTK-DGPS da costa central do estado de Santa Catarina, Brasil, validaram e calcularam as incertezas do método utilizado pela plataforma. O resultado demonstrou que o método apresenta Erro Quadrático Médio (RMSE) de 8,84 m e viés de 8,3 m em direção ao mar.

Assim como os dados de posição da linha de costa obtidos a partir de imagens aéreas, as linhas de costa derivadas de imagens de satélite podem cobrir grandes extensões ao longo da costa, permitindo analisar o seu comportamento em diferentes arcos praias e em diferentes setores da mesma praia que se comportam de forma diferentes. Por vezes, para melhor interpretar e compreender estas vastas áreas amostradas, os estudos reduzem a dimensão espacial da base de dados. Castelle *et al.* (2023) reduziram a dimensão espacial calculando a média móvel da posição da linha de costa a partir de grupos que possuem o mesmo ângulo de orientação da linha de costa e uma distância máxima entre eles. Silva *et al.* (2016), sob o pretexto de reduzir erros e incertezas entre transectos, reduziram a dimensão espacial da sua

base de dados aplicando média móvel simples. Enquanto Genz *et al.* (2007) aplicaram método de agrupamento mais complexo para reduzir a dimensão espacial, os autores setorizaram a costa testando a diferença entre conjuntos de transectos com base no teste-*t* de Student usando taxas de erosão/acreção calculadas a partir de *Reweighted Weighted Least Squares* (RWLS).

Portanto, a posição da linha d'água fornecidas pelo CASSIE pode ser utilizada como indicador para quantificar as variações e tendências da linha de costa. Especificamente quando derivada da missão Landsat, a sua utilização é recomendada para ambientes de micro-marés, os seus dados podem ser utilizados para análise em escala temporal interanual à decadal e escala espacial local à global, com precisão de sub-pixel de ~10-15 m, e resolução temporal de até ~14 dias. Para reduzir os efeitos da variação da linha de costa de períodos curtos (< 1 ano), as análises são geralmente baseadas em termos médios. E, para facilitar a interpretação dos ambientes das praias, os dados da linha de costa são agrupados espacialmente.

As praias adjacentes à baía da Babitonga (Figura 1), no estado de Santa Catarina (SC), Brasil, têm sido objeto de estudo quanto à sua dinâmica sedimentar nas últimas décadas (Souza, 1999, 2001; Ângulo e Souza, 2004; Abreu e Gré, 2006; Abreu, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Klein *et al.*, 2016; Camargo, 2020; Costa *et al.*, 2019; Galvão *et al.*, 2023), assim como a erosão observada na praia do Pontal e Itapoá, localizadas ao norte da desembocadura da baía da Babitonga (Souza, 1999; Souza e Ângulo, 2003; Angulo *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2012; Camargo, 2020). A atividade de dragagem do canal de navegação do sistema portuário da baía da Babitonga tem sido indicada como um possível contribuinte para a erosão destas praias (Angulo *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2012). O presente estudo visa contribuir para o conhecimento destas praias, incluindo a praia do Pontal e Itapoá, analisando o comportamento de sua linha de costa na escala interanual-decadal, usando SDS disponibilizados pela plataforma CASSIE.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

Os sistemas praias Enseada-Itaguaçu, Forte-Capri e Pontal-Itapoá estão localizados no entorno da desembocadura da baía da Babitonga, no litoral norte do estado de Santa Catarina (SC), Brasil (Figura 1).

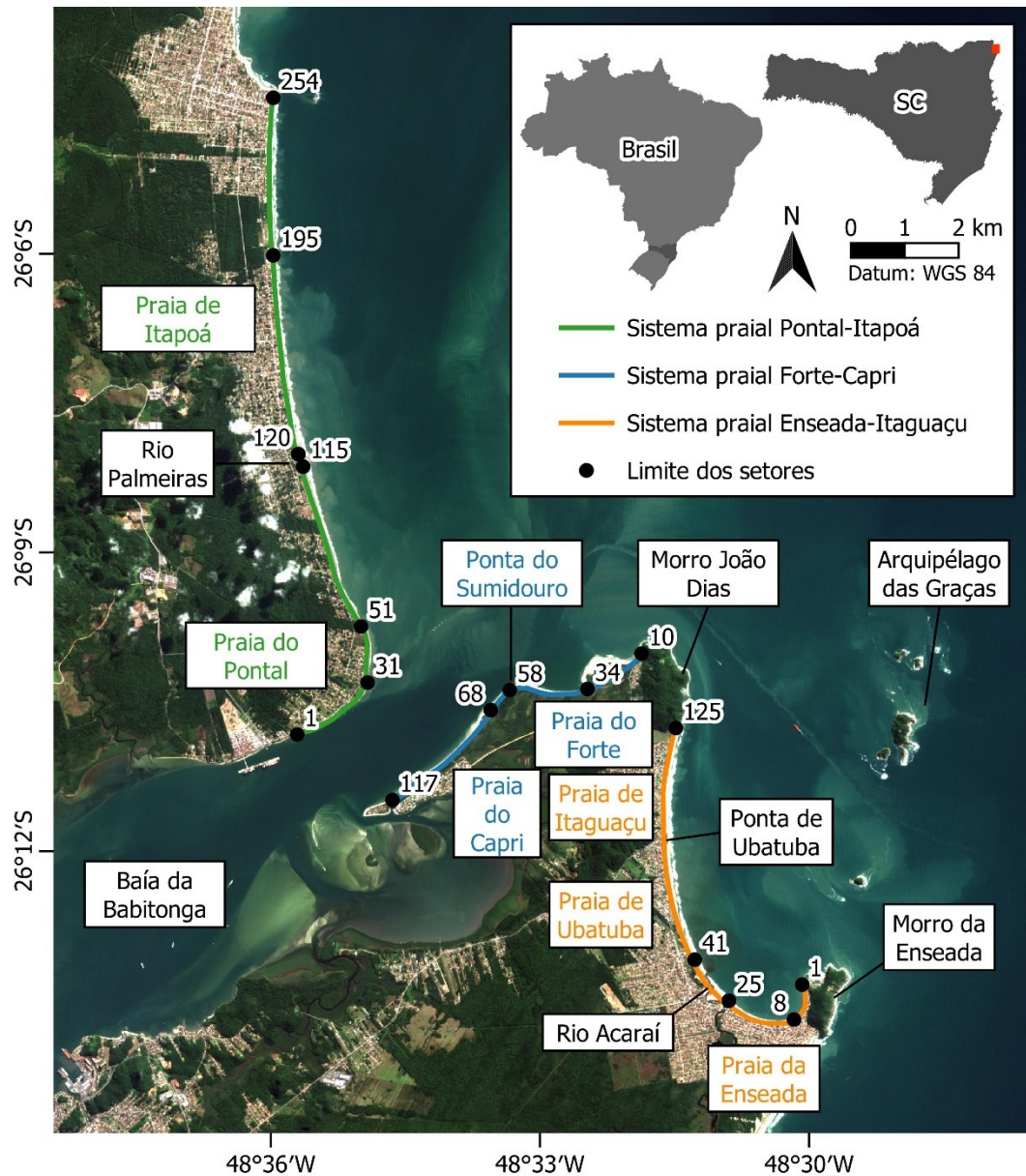


Figura 1. Área de estudo dos sistemas praias do entorno da desembocadura da baía da Babilonga e suas feições geomorfológicas: O sistema praial Enseada-Itaguaçu é composto pelas praias da Enseada, Ubatuba e Itaguaçu. Na praia da Enseada, entre os pontos 1 e 8, está instalada uma estrutura rígida longitudinalmente à costa (enrocamento). O sistema praial Forte-Capri é composto pelas praias do Forte, Ponta do Sumidouro e Capri. O sistema praial Pontal-Itapoá é composta pelas praias do Pontal e Itapoá. Os pontos representam os locais dos transectos que iniciam os setores identificados pelo diagrama de Hovmoller e pela clusterização hierárquica.

A região da baía é caracterizada pela planície costeira do quartenário, composta por depósitos pleistocênicos e holocênicos, formada por paleo-lagoas e paleo-cordões litorâneos; pela presença de afloramentos rochosos que formam

pequenas ilhas, como o Arquipélago das Graças em frente ao sistema praiial Enseada-Itaguaçu, e promontórios que delimitam as praias (Horn Filho, 1997; Souza, 1999, 2001; Angulo e Souza, 2004; Abreu e Gré, 2006; Klein *et al.*, 2016; Galvão *et al.*, 2023).

Atualmente, a região é marcada pela ausência de contribuições significativas de areias clásticas de origem fluvial para as praias. Embora a área de estudo possua diversas descargas fluviais, as mais significativas, em termos de volume, aportam sua carga sedimentar para ambientes estuarinos ou lagunares, confinando-os (Abreu, 2011; Klein, 2016). Os sistemas praiiais Enseada-Itaguaçu, Forte-Capri e Pontal-Itapoá possuem descargas fluviais de menor volume e, por estarem localizados na planície costeira, seu aporte de material sedimentar para a costa é limitado pelo baixo gradiente de seu perfil longitudinal (Abreu, 2011).

Assim, a principal fonte de sedimentos nos sistemas praiiais analisados neste estudo está principalmente relacionada com o aporte de sedimentos policíclicos provenientes da plataforma continental adjacente (Abreu, 2011). Este material pode resultar do retrabalhamento de planícies costeiras antigas e atuais da região, sendo distribuído ao longo da costa por processos longitudinais (Abreu, 2011). O transporte longitudinal de sedimentos em escala regional da área de estudo é de sul para norte (Abreu, 2011; Klein, 2016).

A maré na área de estudo é predominantemente semi-diurna, com amplitude média de 0,70 m e máxima de 1,06 m, classificada como regime de micro-maré (Truccolo, 1998; Truccolo e Schettini, 1999). O nível do mar pode atingir 1 m acima da maré astronómica quando sob a influência meteorológica de sistemas frontais (Truccolo, 1998; Truccolo e Schettini, 1999).

As ondulações predominantes são de sudeste (H_s : 0,5-2,1 m, T_s : 7-15 s) e leste (H_s : 0,3-1,7 m, T_s : 5-11 s) associadas à passagem de frentes frias, enquanto as vagas são predominantemente de leste-nordeste (H_s : 0,3-1,5 m, T_s : 5-11 s) e sul-sudeste (H_s : 0,3-2,25 m, T_s : 4-8 s) (Alves, 1996). Araujo *et al.* (2003) demonstram que há um aumento da altura significativa de onda (H_s) ao longo das estações do ano, do verão para o inverno, embora as condições extremas ocorram ao longo de todas as estações.

O sistema praiial Enseada-Itaguaçu tem ~7,5 km de extensão. Possui forma de planta parabólica controlada pelo promontório do Morro da Enseada, localizado na extremidade sul do sistema. Ao Norte, seu limite é o promontório do Morro João Dias.

Ao longo do sistema existem diferentes graus de exposição às ondas, com menor exposição ao Sul e na região de sombra das ilhas do Arquipélago das Graças (Abreu, 2011; Klein *et al.*, 2022). O transporte sedimentar longitudinal líquido é em direção ao Norte (Abreu, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2019). O sistema possui como aporte sedimentar aquele que transpõem o promontório do Morro da Enseada (Abreu, 2011; Silveira *et al.*, 2012). O sistema é composto pelas praias da Enseada, Ubatuba e Itaguaçu (Figura 1). A praia da Enseada se estende do Morro da Enseada até a desembocadura do rio Acaraí, possui ~800 m de estrutura rígida (enrocamento) ao longo da linha de costa que tangencia o Morro da Enseada (entre o ponto 1 e 8 da Figura 1). Esta estrutura foi instalada na década de 70 (Camargo, 2020). Ao norte do rio Acaraí está a praia de Ubatuba, seguida pela praia de Itaguaçu. O limite entre estas duas praias é o afloramento rochoso da Ponta de Ubatuba, que não tem projeção suficiente em direção ao mar para interromper o transporte sedimentar longitudinal entre elas (Abreu, 2011).

O sistema praias Forte-Capri tem ~6 km de extensão. Está orientado paralelamente à desembocadura da baía da Babitonga, sendo exposto apenas às ondulações de leste-nordeste (Costa *et al.*, 2019; Klein *et al.*, 2022). O transporte sedimentar longitudinal é forçado por interações não lineares entre as forçantes da maré e das ondas, possuindo direção resultante para o interior da baía da Babitonga (Silveira *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2019). O sistema possui aporte de sedimento daquele que transpõem o promontório do Morro João Dias (Silveira *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2019). O sistema é composto pelas praias do Forte, Ponta do Sumidouro e Capri (Figura 1). O Morro João Dias ancora a formação de um esporão arenoso na praia do Forte (Abreu, 2011; Camargo, 2020). A praia da Ponta do Sumidouro projeta sua linha de costa em direção ao canal principal da desembocadura da baía da Babitonga. O limite entre a praia da Ponta do Sumidouro e a praia do Capri é marcado pelo início de uma barra arenosa que se desenvolve em direção ao interior da baía, ela possui um sistema hidrológico à sua retaguarda. Este sistema hidrológico possui influência marinha proveniente da baía e da drenagem fluvial da planície costeira.

O sistema praias Pontal-Itapoá tem ~12 km de extensão. O sistema é composto pelas praias do Pontal e Itapoá (Figura 1). A praia do Pontal apresenta uma inflexão da orientação da linha de costa que muda de sudeste-nordeste (paralelamente ao canal principal da desembocadura da baía da Babitonga) para sul-norte. O arco praias de Itapoá, com ~7,8 km de extensão, segue a orientação sul-norte.

A praia do Pontal é protegida das ondulações e vagas mais energéticas, ao contrário da praia de Itapoá que é mais exposta (Klein *et al.*, 2022). O transporte sedimentar longitudinal líquido ocorre para norte e para sul, com uma área de divergência na praia de Itapoá (Silveira *et al.*, 2012). A área onde ocorre a divergência recebe aporte sedimentar do material que transpõem a desembocadura da baía da Babitonga pelo lobo terminal e bancos de areia do delta de maré vazante (Silveira *et al.*, 2012; Pulling, 2023).

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento a respeito da dinâmica sedimentar nas praias do entorno da desembocadura da baía da Babitonga, SC, Brasil.

Para isto, foram conduzidas análises da evolução da linha de costa com o objetivo de identificar processos sedimentares costeiros de escala interanual a decadal e tendências de progradação/retrogradação da linha de costa.

3 COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA NAS PRAIAS ADJACENTES À DESEMBOCADURA DE BAÍA COM BASE NA ANÁLISE DE IMAGENS DE SATÉLITES PÚBLICAS

Este capítulo apresenta o conteúdo do artigo que compõe esta dissertação e foi submetido para publicação em 22/02/2024. A seguir seu conteúdo é reproduzido com ajustes na formatação.

SHORELINE BEHAVIOR OF BEACHES ADJACENT TO BAY INLET BASED ON PUBLIC SATELLITE IMAGERY ANALYSIS

Marcos Felipe Tomasi ^{1*}, Antonio Henrique da Fontoura Klein ^{1,2}

1 Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Programa de Pós-graduação em Oceanografia. Rua Desembargador Vitor Lima, 222, Trindade, 88040-400, Florianópolis SC, Brazil.

2 Laboratório de Oceanografia Costeira, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Coordenação Especial de Oceanografia. Campus Reitor João David Ferreira Lima, s/n, Trindade, 88040-900, Florianópolis SC, Brazil.

* Corresponding author: marcos.f.tomasi@gmail.com

3.1 ABSTRACT

The waterline position derived from publicly available satellite imagery has been a novel and increasingly used method to acquire high spatial-temporal scale and with enough resolution data to study shoreline behavior. In this study, to enhance understanding of the shoreline behavior and evolution of the beach systems adjacent to Babitonga bay inlet, SC, Brazil, the CASSIE platform was used to generate ~40 years of satellite-derived waterline position data. The shoreline behavior and evolution of these systems were investigated through Hovmoller diagram interpretation, beach systems sectorization and shoreline change rate of the identified sectors. The Hovmoller diagram was drawn up using the annual average shoreline position. The beach systems sectorization was made up with the Hovmoller diagram interpretation allied to Hierarchical Clustering analysis. The shoreline change rate of each sector was conducted for the average transect data that make up the sectors. The results revealed the occurrence of sedimentary pulses on the Enseada and Forte beaches, which starts at headland and propagates along the Enseada beach and Forte-Capri beach system;

Also, was identified significant erosion trends on the boundary of Ponta do Sumidouro and Forte beach, at second sector of Forte-Capri beach system, with Linear Regression Rate (LRR) of -4.11 m/year (CI = ± 0.59 m/year), at the second and third sector of Pontal-Itapoá beach system with LRR of -1.61 m/year (CI = ± 0.31 m/year) and -0.90 m/year (CI = ± 0.18 m/year), respectively. The remaining sectors embodying beach environments were classified as stable state.

Key words: cassie, waterline, beach sectorization, change rate, sand pulse, headland bypass

3.2 INTRODUCTION

Shoreline position data is frequently employed in studies to quantify erosion/deposition of sediments in beach environments (Hanson, 1989; Dabees and Kamphuis, 1998; Ranasinghe *et al.*, 2004; Short and Trembanis, 2004; Boak and Turner, 2005; Hanslow, 2007; Hapke *et al.*, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Burningham and French, 2017; Ribeiro, 2017; Luijendijk *et al.*, 2018; Mentaschi *et al.*, 2018; Vousdoukas *et al.*, 2020; Bishop-Taylor *et al.*, 2021; Valverde, 2023). These data are also used to identify and describe different coastal processes, such as headland bypass (Silva *et al.*, 2016, 2021), coastal storm impacts (Fenster and Dominguez, 2022) and large sediment accretion wave propagation (Warrick *et al.*, 2023).

The shoreline position can be inferred through analysis of maps, nautical charts, aerial photographs, topographic surveys, LIDAR and video monitoring (Boak and Turner, 2005). Despite the diversity of methods for monitoring the shoreline, less than 1% of the beaches are monitored at sufficient temporal and spatial resolution around the globe to be able to describe the processes involving these environments, especially over large spatial and temporal scales (Vitousek *et al.*, 2023). Waterline position data derived from satellite imagery has been used as a proxy for the shoreline position to fill this gap (Satellite Derived Shoreline – SDS), providing data with pixel/temporal resolution of 1-30 m/1-15 days and accuracy of ~ 5 -15 m, covering periods from 1984 to present (Hagenaars *et al.*, 2018; Luijendijk *et al.*, 2018; Vos, Harley, *et al.*, 2019, 2023; Vos, Splinter, *et al.*, 2019, 2023; Almeida *et al.*, 2021; Castelle *et al.*, 2022; Vitousek *et al.*, 2023).

Vitousek *et al.* (2023) reviewed methods of SDS. According to the authors, the main and common step between the methods is the use of image indices, such as the

classification of pixels into land or water using the Normalized Difference Water Index (NDWI). The nature of satellite images and the methodology used to classify the pixels and delineate the shoreline generates uncertainties due to image resolution, georeferencing and co-registration, as well as image noise that makes it difficult to define the threshold that distinguishes pixels between land and water. This difficulty arises mainly from high frequency coastal processes such tide level, wave setup and wave swash (Vitousek *et al.*, 2023; Vos, Splinter, *et al.*, 2023).

The methodologies used in SDS do not yet provide solutions to most of the uncertainties related to relatively high frequency coastal processes (Vitousek *et al.*, 2023). Vos *et al.* (2020) proposed an algorithm that corrects the position of the shoreline based on sea level and beach slope. Other authors use spatial and/or temporal averages to reduce the influence of these effects (Silva *et al.*, 2016; Luijendijk *et al.*, 2018; Castelle *et al.*, 2023). Despite the uncertainties inherent to SDS, Vos, Splinter *et al.* (2023) demonstrate that SDS in wave-dominated micro-tidal beaches reach accuracy of ~10 m, being suitable for inferring their variations on different time scales.

Almeida *et al.* (2021) developed the Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE), it is an open-source platform hosted on the World Wide Web that uses Google Earth Engine API to extract the waterline from Landsat (Surface Reflectance) and Sentinel (Top of Atmosphere) satellites imagery. Its algorithm calculates the NDWI for each pixel of the image and classifies it as land or water depending on the threshold set for the index, it is possible to use the Otsu (1979) algorithm to classify it automatically. The SDS resulting from CASSIE achieves a sub-pixel resolution applying 1-D Gaussian filter. Although its methodology doesn't apply any correction regarding the high frequency coastal processes, Almeida *et al.* (2021) using RTK-DGPS data from the central coast of Santa Catarina state, Brazil, validated and calculated the uncertainties of the method used by the platform, its resulted in a RMSE of 8.84 m and bias of 8.3 m towards the sea.

Just like shoreline position data derived from aerial images, SDS can cover large spatial extensions, making it possible to analyze their behavior in different beach arcs and sectors of the same beach that's behave differently. Sometimes, to better interpret and understand these vast sampled areas, studies reduce the spatial dimension of the database. Castelle *et al.* (2023) reduced the spatial dimension calculating the moving average of the shoreline position from groups that have the

same shoreline orientation angle and a maximum distance between them. Silva *et al.* (2016), on the pretext of reducing errors and uncertainties between transects, reduced the spatial dimension of their database applying a simple moving average. While Genz *et al.* (2007) applied a more complex grouping method to reduce the spatial dimension, the authors sectorized the coast testing the difference between multiple sets of transects based on Student's t-test using erosion/accretion rates calculated by Reweighted Weighted Least Squares (RWLS).

Therefore, SDS provided by CASSIE can be used as indicators to quantify shoreline changes. When derived from Landsat mission, specifically, their use is recommended for micro-tidal environments, their data can be used for analysis on time scales ranging from inter-annual to decadal, and spatial scales ranging from local to global, with a sub-pixel accuracy of ~10-15 m, and temporal resolution of ~14 days. To reduce the effects of shoreline variation over short periods (< 1 year), the analyses are usually based on average terms. And to facilitate the interpretation of beaches environments, shoreline data is grouped spatially.

The Babitonga bay inlet adjacent beaches (Figura 1), in Santa Catarina state (SC), Brazil, have been subject of study regarding their sedimentary dynamics in recent decades (Souza, 1999, 2001; Angulo and Souza, 2004; Abreu and Gré, 2006; Abreu, 2011; Silveira *et al.*, 2012; Klein *et al.*, 2016; Camargo, 2020; Costa *et al.*, 2019; Galvão *et al.*, 2023), likewise the retrogradation observed in Pontal beach (Souza, 1999; Souza and Ângulo, 2003; Angulo *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2012; Camargo, 2020), located northward Babitonga bay inlet, that's has raised concerns among coastal managers. This study aims to contribute to the knowledge about the Babitonga bay inlet adjacent beaches, including the Pontal beach, by analyzing the behavior of their shoreline on interannual-decadal scale, using SDS from CASSIE platform.

3.3 METHODS

Using the CASSIE platform (Almeida *et al.*, 2021), the shorelines of the study area were extracted from Landsat Surface Reflectance imagery to obtain the longest time series available on the platform (1984-2023). The images were previously filtered automatically by the CASSIE algorithm to select only images with cloud cover below 10%. Then, the images were selected by the user to exclude imagens containing clouds close to the mainland/water interface. The baselines were established in parallel to the planform shape of the beach systems, it was draw up in a way that

CASSIE calculates the shoreline distance from the baseline using the waterline nearest to the ocean for the cases where the transects intercepts two or more time the identified waterline, as can occurs where the coast has features like sandbars, spits and lagoons. Transects were set up every 50 m along the baseline. The Otsu (1979) threshold used was the automatically suggested by CASSIE, with input equals to zero. The generated data is available at Mendeley Data cloud-based communal repository (Tomasi, 2024).

To interpret the behavior of the shoreline over time, on an interannual-decadal scale, the annual averages (\bar{Y}_i) of the data series were used, regardless of the number of observations present in the years, as Equation (1). The observations dates are in Supplementary Material 1.

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_{i,1} + \dots + Y_{i,n}}{n} \quad (1)$$

Where, \bar{Y}_i represents the annual average of the i^{th} year and n the number of observations within a year.

Hovmoller diagrams (HovmÖller, 1949) were drawn up from the series of annual averages (\bar{Y}_i), where the horizontal axis represents time (years), the vertical axis represents the transects (longshore distance) and the color scale represents the shoreline position anomaly. The shoreline position anomaly is the distance between the annual averages shorelines positions (\bar{Y}_i) to its average position ($\bar{\bar{Y}}$). The average of annual averages shorelines positions ($\bar{\bar{Y}}$) is described by Equation (2). And the anomaly is the subtraction of annual averages shoreline position (\bar{Y}_i) from the average of annual averages shoreline position ($\bar{\bar{Y}}$). The series of annual averages (\bar{Y}_i) and average of annual averages shorelines positions ($\bar{\bar{Y}}$) were defined for each transect.

$$\bar{\bar{Y}} = \frac{\bar{Y}_1 + \dots + \bar{Y}_i}{i} \quad (2)$$

The color scale in Hovmoller diagram when positive (blue scale) represents anomalies towards the sea and negative values (red scale) towards the mainland. The color scale categorized distances anomalies into intervals of 15 m. However, the categories between -15 to 15 m were not represented on color scale to highlight fluctuations above the accuracy of Shorelines Derived from Satellites (~10-15 m) indicated by the literature (Vitousek *et al.*, 2023; Vos, Splinter, *et al.*, 2023). Contour

lines were added to encompass anomalies categorized by the color scale. Unlike the color scale, the contour lines classify anomalies between -15 and 15 m, including lines equals to zero that's represents no anomaly (shoreline position equals to the average of annual averages shorelines positions, \bar{Y}).

The sectorization aims to group transects in which the annual averages shorelines positions (\bar{Y}_i) behaves similarly to each other and differently to neighboring transects groups. Each group formed was called a sector of the beach system.

The sectorization was conducted based on two analyses, one subjective and the other objective. The two forms of analysis complement and assist each other. The so-called subjective analysis is the authors interpretation of the behavior of the shoreline in the Hovmoller diagrams. The so-called objective analysis is the Hierarchical Clustering analysis (Bar-Joseph *et al.*, 2001; Wilks, 2011) of the transects. Therefore, from the joint analysis of the dendrogram resulting from the Hierarchical Clustering and interpretation of the Hovmoller diagrams, the beaches systems were sectorized.

The clustering method was the single linkage (nearest point) between the intermediary's clusters formed and the distance measure was $1-r$, where r is Pearson's correlation coefficient. It was preferred to use this distance measure ($1-r$) to evaluate the similar behavior of the shoreline position in each transect (linear relationship between the transects), while other distances measures, like Euclidian distance, evaluates the distance between the data distribution.

After identifying the sectors of each beach system, the raw data series was rearranged based on the averaging of the transects data that make up each sector (longshore spatial average). This rearrangement intends to transform the data series to express it regarding each sector, instead of each transect. The Equation (3) demonstrates this rearrangement.

$$\bar{X}_s(t) = \frac{Y_1(t) + \dots + Y_T(t)}{T} \quad (3)$$

Where $Y_T(t)$ is the distance of the shoreline relative to the baseline in T^{th} transect and time t (time corresponds to datetime of image acquisition). Therefore, the rearranged data series (\bar{X}) of each sector s has the number of observations equal to the number of imagens obtained in CASSIE. The graphs resulting from this rearrangement are in Supplementary Material 2, 3 and 4.

From the rearrangement (\bar{X}), a set of statistics commonly used in shoreline behavior studies was calculated (Thieler *et al.*, 2009), as described below:

- End Point Rate (EPR): rate of shoreline change (in meters/year), calculated by dividing the distance of shoreline movement by the time elapsed between the oldest and the most recent shoreline.
- Linear Regression Rate (LRR): rate of shoreline change (in meters/year), based on the slope of the linear regression line, computed by fitting a least-squares regression line to the resampled shoreline points. Were also calculated the corresponding Confidence Interval (CI) at 95% confidence level of the slope of the linear regression line. The LRR results were used to classify the chronic beach erosion state of each sector based on the scheme proposed by Esteves and Finkl (1998), as shows Table 1. The classification was carried out considering values above the CI. Furthermore, the classification wasn't done to sectors related to sand spits and river inlets.

Table 1. Classification of shoreline based on Linear Regression Rate (LRR) shoreline change rate.

Shoreline Change Status	LRR Condition
Accreted	> 0.5 m/year
Stable	-0.5 to 0.5 m/year
Eroded	-1 to 0.5 m/year
Critically Eroded	< -1 m/year

3.4 RESULTS

3.4.1 Enseada-Itaguaçu beach system

The imagery repository used in CASSIE for Enseada-Itaguaçu beach system covers the years 1984 to 2021 and it has no images without clouds close to mainland/water interface in years 2001, 2002, 2012 and 2018, consequently the database has gaps in these years (gray gaps in Figure 2).

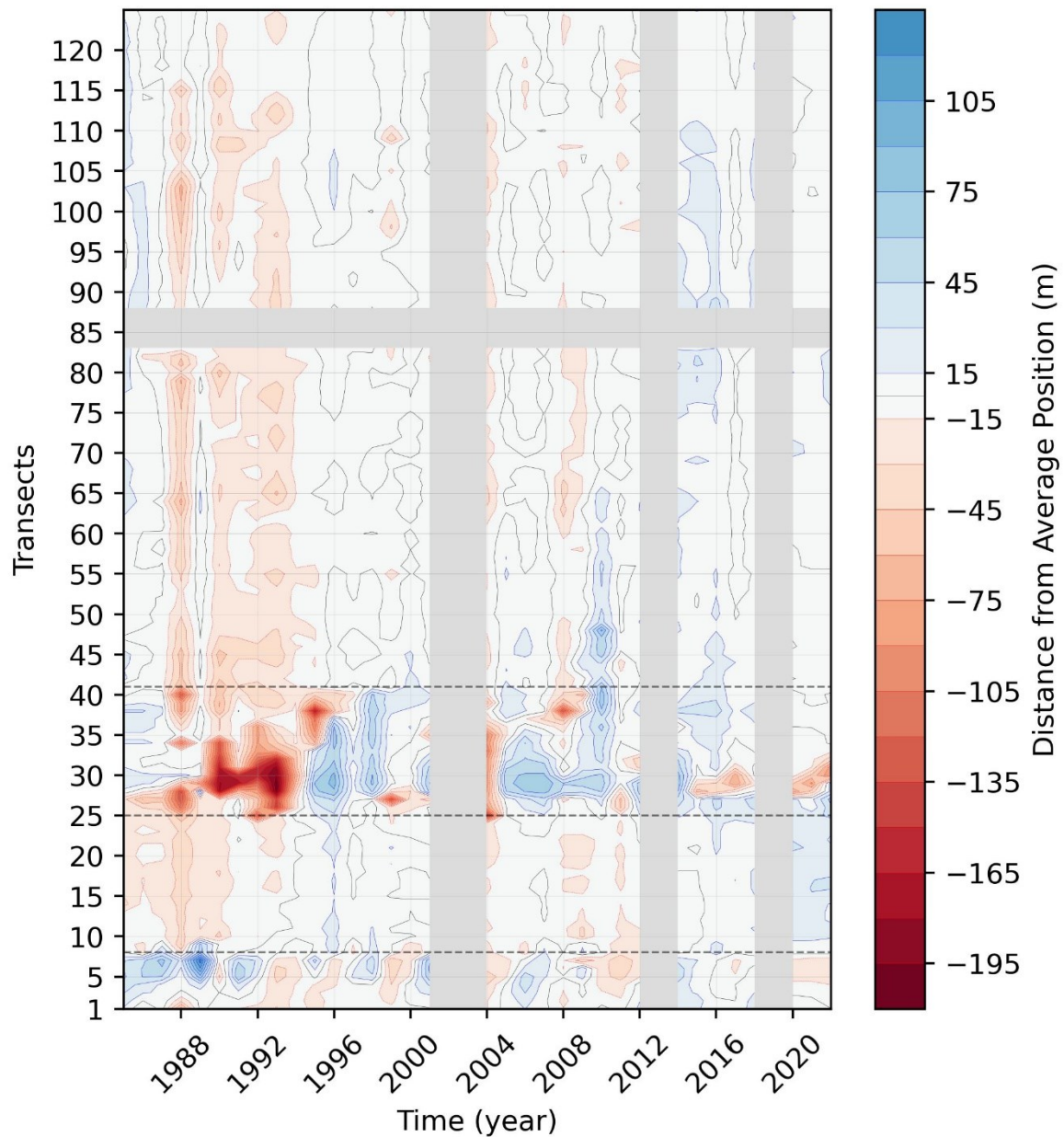


Figure 2. Enseada-Itaguaçu beach system Hovmoller diagram. Years that had no data are symbolized by grey gaps, as well as the transects that were disregarded due to the presence of rocky shoreline. The sectors are delimited by the dashed line. First sector: transects 1-7; second sector: transects 8–24; third sector: transects 25-40; fourth sector: transects 41-125.

The Hovmoller diagram for Enseada-Itaguaçu beach system (Figure 2) reveals four distinct sectors that's behave differently. The first sector, situated adjacent to Morro da Enseada (transects 1-7), is the most sheltered area within the system, with shoreline orientation in NNE-SSW direction. It is marked by the presence of hard structure along the entire sector that was built in 70s (Camargo, 2020). It exhibits

alternating erosional and depositional states interspersed throughout the data series. Each state persists for approximately two years and drifts into the contiguous transects in the longshore sediment transport direction, as a sediment pulse wave. These pulses fluctuate around the tendency of the shoreline which is stable throughout the time series tendency (LLR = -0.43 m/year, CI = ± 0.44 m/year, Table 2).

The second sector, where the system drastically changes the shoreline direction to SE-NW, is between Morro da Enseada and Acaraí river inlet (transects 8-24). This sector presents an erosive state between 1985 to 1993 and 2004 to 2012, and a depositional state between 2015 to 2021. These states occur almost homogeneously along the transects (contour lines with vertical orientation). This sector appears to behave with negative correlation with the first sector, suggesting an assimilation of the sediment accretion wave from the first sector by the second sector. This sector presents LLR of 0.66 m/year (CI = ± 0.28 m/year) and could be classified as accreted state, but it is below the CI (Table 2).

The third sector, situated at the Acaraí river mouth (transects 25 to 40), delineates the boundary between Enseada and Ubatuba beaches. It presents erosional state hotspots migrating to north direction, which, sporadically, returns to the starting position. This phenomenon is associated to the inlet migration of Acaraí river, where a sand spit forms. The longitudinal sand transport increases the sand spit in the down drift direction, shifting the river inlet to north and, as the river meanders in the rear of the beach, the river inlet returns to its starting position.

The fourth sector, coverages Ubatuba and Itaguaçu beaches (transects 41-125), the longest sector of the Enseada-Itaguaçu beach system (approximately 4470 m long). These beaches are divided by Ponta de Ubatuba rocky outcrop, located at the transects 84-87 that was disregarded from the analysis. The sector experiences an erosive state between 1987 to 1994, followed by a relatively stable period around the average shoreline position. These states manifest almost homogeneously along the transects (contour lines with vertical orientation). This sector presents LLR of 0.40 m/year (CI = ± 0.33 m/year), classified as stable state (Table 2).

The fourth sector behaves like the second, although the last one appears to receive greater influence from the accretion sediment wave from the first sector. This distinct behavior may be associated with the interception of sediments by river discharge from the Acaraí River, as pointed out by Abreu (2011).

Table 2. Shoreline behavior statistics for Enseada-Itaguaçu sectors. EPR: End Point Rate; LRR: Linear Regression Rate; CI (95%): Confidence interval of LRR at 95% of confidence level.

<i>Beach system</i>	<i>Sector</i>	<i>EPR (m/year)</i>	<i>LRR (m/year)</i>	<i>CI (95%)</i>	<i>Classification</i>
<i>Enseada-Itaguaçu</i>	4	-0.22	0.40	0.33	Stable
	3	-0.58	0.69	0.92	-
	2	1.17	0.66	0.28	Stable
	1	-1.27	-0.43	0.44	Stable

The hierarchical cluster analysis captured the different behaviors observed at the Hovmoller diagram using a value for dissimilarity of 0.248, except by the transects 8 – 9 and 26 - 27 that were grouped at two different groups and the transect 25 that remained alone (Supplementary material 5).

3.4.2 Forte-Capri beach system

The imagery repository used in CASSIE for Forte-Capri beach system covers the years 1985 to 2021 and it has no images without clouds close to mainland/water in years 1987, 1989 and 2012, consequently the database has gaps in these years. The Hovmoller diagram includes a gap in 1988 because it hasn't neighbor data to be interpolated (gray gaps in Figure 3).

The Forte-Capri beach system's Hovmoller diagram (Figure 3) reveals four sectors that's behave differently. The first sector, encompassing Forte beach (transects 10-33), displays the highest shoreline position variability within the Forte-Capri beach system. Its most erosional state occurs between 1986 and 2000, however, between 1993 and 1995, it presented a significant pulse of sand accretion and a less significant pulse between 2000 and 2002. These pulses are progressively smaller over time (between 2002 to 2011), until 2011, when the sector begins to show a constant and significant progradation till 2021, being the most depositional state period of the sector. The diagonal boundary (contour lines with diagonal orientation) of each state indicates that longitudinal sediment transport is towards Babitonga bay. Also, the great variability of the shoreline position in the sector is associated with a sand spit formation anchored in Morro João Dias headland, which the tongue of sand can reach one kilometer in length.

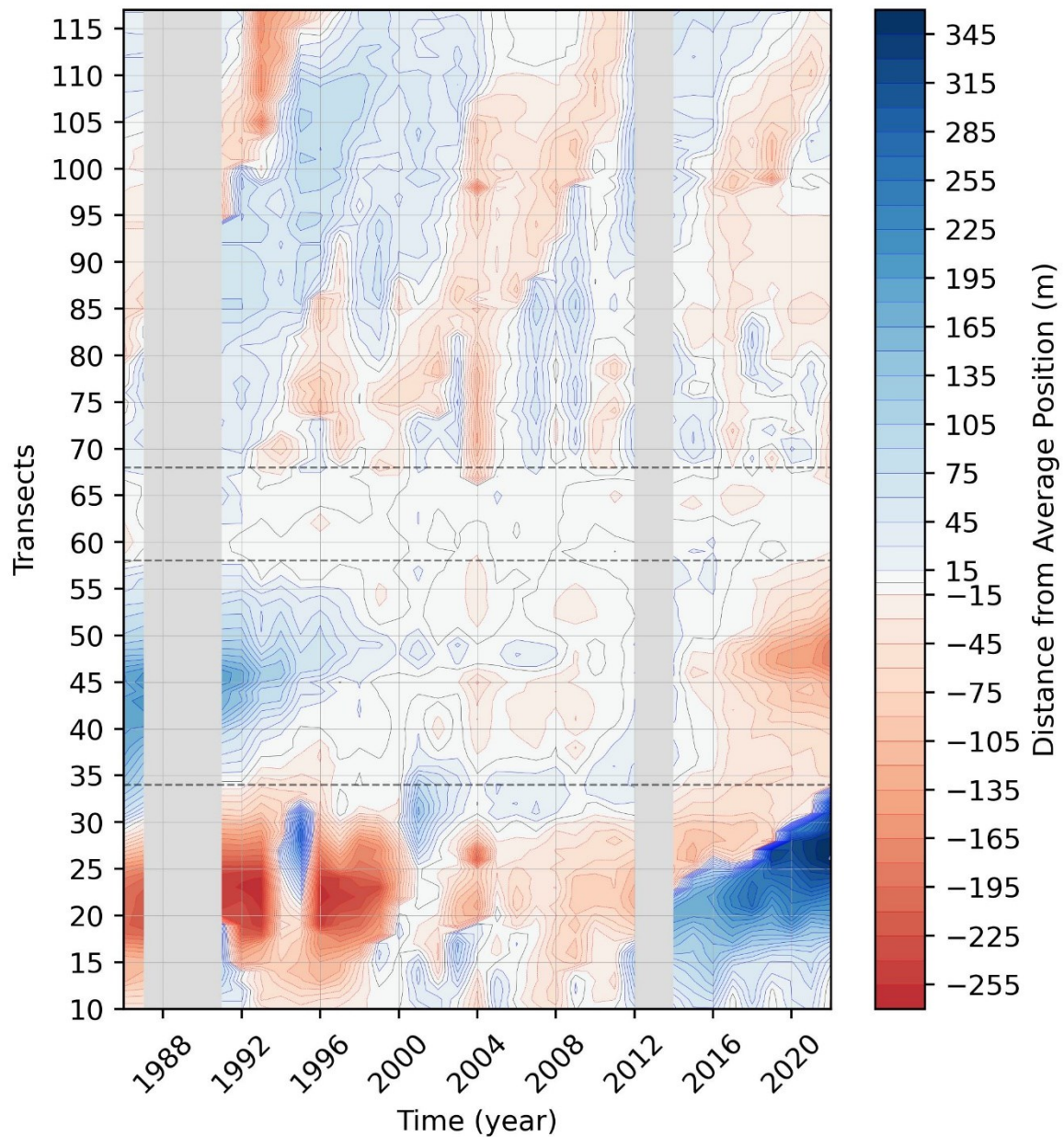


Figure 3. Forte-Capri beach system Hovmoller diagram. Years that had no data are symbolized by gray gaps. The sectors are delimited by the dashed line. First sector: transects 10-33; second sector: transects 34–57; third sector: transects 58-67; fourth sector: transects 68-117.

The second sector, between Forte beach and Ponta do Sumidouro (transects 34-57), seems to behave oppositely to the first sector with lower variability. It starts from a depositional state from 1986 to 1999, undergoing a relatively stable state around the mean position of the shoreline between 2000 and 2015, ending in an erosive state between 2016 and 2021. Its behavior is closely linked to the previous sector, since the sediment stored in the first sector causes sediment deficit in the second. This sector

presents LLR of -4.11 m/year (CI = ± 0.59 m/year), been classified as critically eroded (Table 3).

The third sector, located at Ponta do Sumidouro (transects 58-67), presents a stable behavior along all the data series (LRR = -0.22 m/year, CI = ± 0.22 m/year).

The fourth sector, covering Capri beach (transects 68-117), the longest sector of the Forte-Capri beach system (approximately 2500 m long), the Hovmoller diagram presents bands arranged diagonally, which correspond to periods of progradation and retrogradation of the shoreline associated to sedimentary pulses. The horizontal length of the bands indicates that progradation/retrogradation process occurs in periods of 4 to 11 years and the vertical length of the bands indicates the spatial extension of each process, occurring between 1200 to 1700 m. These sedimentary pulses also influence the position of two river inlets near the transects 68 and 104, developing sandy spits in a sand bar environment. This sector presents LLR of -0.57 m/year (CI = ± 0.72 m/year) and could be classified as eroded, but it is below the CI (Table 3).

The hierarchical clustering analysis for the Forte-Capri beach system (Supplementary material 6), mirrors the observed at Hovmoller with a dissimilarity value of 0.185. However, some differences were pointed out, the transects 31-33 were clustered as an individual group, differentiating them from the transects of the first sector (transects 10-33) and it identifies a different limit between second sector (transects 34-57) and third (transects 58-67) sector, including the transects 58-62 in the second sector and considered the transect 67 as an individual group (a singular transect).

Table 3. Shoreline behavior statistics for Forte-Capri sectors. EPR: End Point Rate; LRR: Linear Regression Rate; CI (95%): Confidence interval for LRR at 95% of confidence level.

<i>Beach system</i>	<i>Sector</i>	<i>EPR (m/year)</i>	<i>LRR (m/year)</i>	<i>CI (95%)</i>	<i>Classification</i>
<i>Forte-Capri</i>	4	0.03	-0.57	0.72	Stable
	3	0.12	-0.22	0.22	Stable
	2	-6.36	-4.11	0.59	Critically Eroded
	1	7.51	7.20	1.12	-

3.4.3 Pontal-Itapoá beach system

The imagery repository used in CASSIE for Pontal-Itapoá beach system covers the years 1985 to 2023 and it has no images without clouds close to

mainland/water in years 1989, 2001 and 2012, consequently the database has gaps in these years (gray gaps in Figure 4).

The Hovmoller diagram for Pontal-Itapoá beach system (Figure 4) demonstrates the presence of five distinct sectors exhibiting different behaviors. The first sector, at Pontal beach, in innermost area to Babitonga bay (transects 1-30), presents a stable behavior along all the data series, with variations mainly below 30 m. Although the variations are below the accuracy of Shoreline position Derived from Satellite (SDS), it seems to behave like an extension of the second sector (transects 31-50), with less amplitude. These two sectors have a well-defined horizontal boundary (contour lines with horizontal orientation) where the amplitude of the shoreline changes is different between them. The difference of amplitude between the first and second sector may be caused by the loss of sediment transported by the littoral drift from the second to the first sector for the main channel of the Babitonga bay inlet, as the main channel approaches to the active beach profile in the first sector. The LRR for the first sector is -0.23 m/year ($CI = \pm 0.07$ m/year), classified as stable (Table 4).

The second sector (transects 31–50), where the shoreline makes an inflection at Pontal beach, displays the greatest variability of the shoreline position along the Pontal-Itapoá beach system. This sector experienced a regression in the average shoreline position starting in 1998 and a progradation starting in 2010, both drifting from the north area of the sector to the south, a process marked diagonally in the diagram (contour lines with diagonal orientation). The drifting behavior with diagonal boundaries in both sectors (first and second sector) indicates that longshore sediment transport occurs in the Babitonga bay direction. The LRR for the second sector is -1.61 m/year ($CI = \pm 0.31$ m/year), been classified as critically eroded (Table 4).

The third sector, encompassing a straight part of Itapoá beach (transects 51-114, 120-194), is divided by the fourth sector (transects 115-119). It exhibits relatively stable behavior throughout all the data series. However, it underwent to an erosive state, changing the position of the shoreline below -15 m of the average position for almost the entire sector after 2004-2005. The change into a more erosive state in the sector presents a well-defined limit on diagonal direction (contour lines with diagonal orientation) between transects 80-140, indicating the longshore sediment transport occurs toward north in this area. Near transect 80 occurs a divergence area of the longshore sediment transport, where sediment is transported to the south and to the north, southward and northward of transect 80, respectively. The LRR for the sector is

equal to -0.90 m/year (CI = ± 0.18 m/year), classified as eroded (Table 4). Unlike the second sector, the erosive process has a constant ratio along the data series.

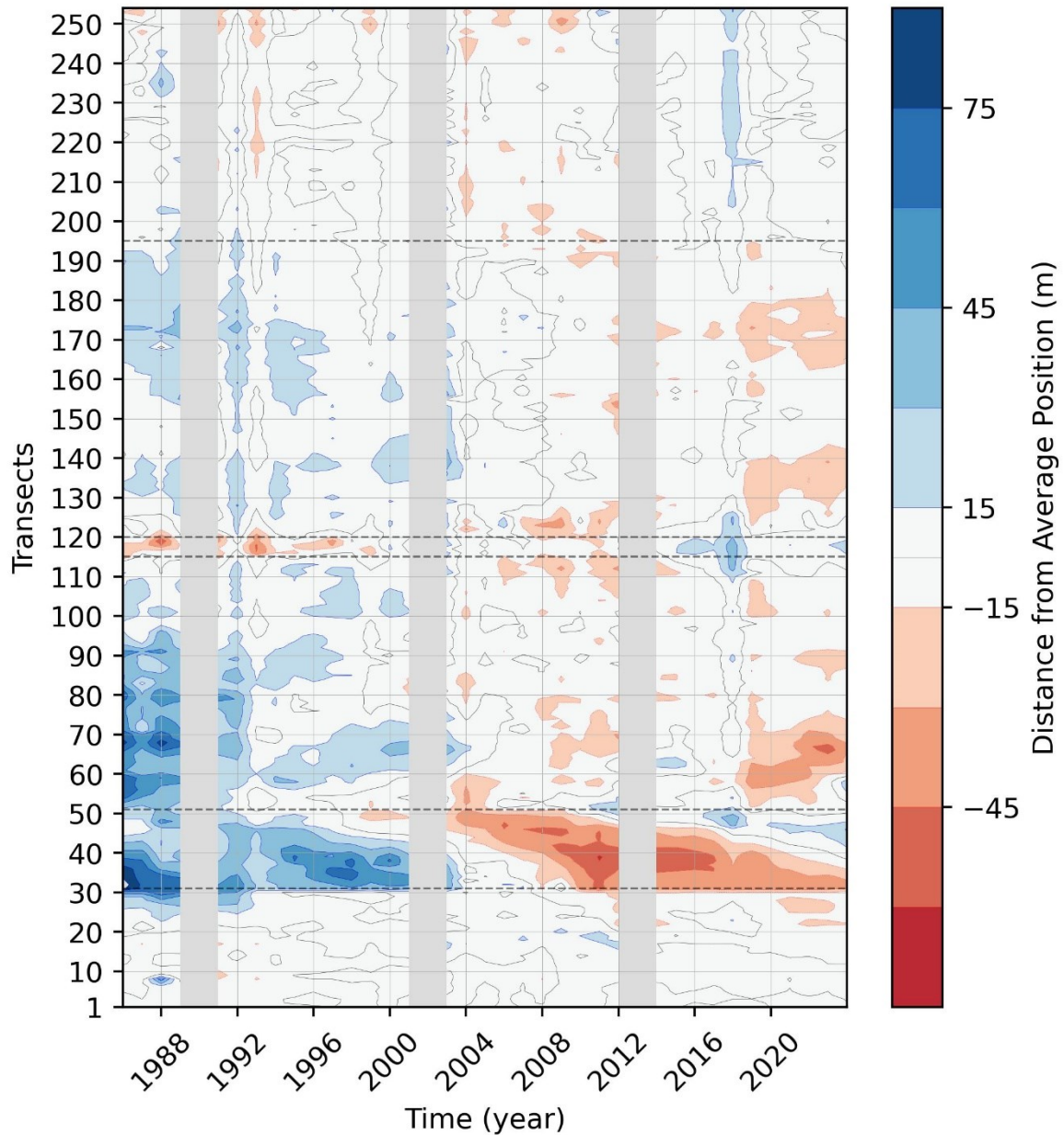


Figure 4. Pontal-Itapoá beach system Hovmoller diagram. Years that had no data are symbolized by gray gaps. The sectors are delimited by the dashed line. First sector: transects 1-30; second sector: transects 31–50; third sector: transects 51-114 and 120-194; fourth sector: transects 115-119; fifth sector: transects 195-254.

The fourth sector (transects 115-119) represents the inlet of Palmeiras river and experienced erosive state hotspots from 1986 to 1999. Followed by an erosive state between 2004 and 2011 and ultimately transitioned to a depositional state from

2014 to 2023. The shoreline positions variations of this sector are mostly below 15 m of the shoreline average position.

The fifth sector, at the north limit of Itapoá beach (transects 195-254), differs from the third sector mainly due to a depositional state in the latter part of the data series, between 2014 and 2023, and, consequently, presents a LRR with a value close to zero, been classified as stable status (Table 4).

The hierarchical clustering analysis conducted on the Pontal-Itapoá transects reveals a greater similarity in behavior within the system compared to the others. Interestingly, the sectorization based on observations from the Hovmoller diagram does not entirely align with the hierarchical cluster, unlike what is observed in other systems. Consequently, no dissimilarity value effectively groups the transects according to their behavior. However, a set of values groups the transects with similar behavior as observed in the Hovmoller diagram.

The hierarchical clustering analysis (Supplementary material 7) grouped the first sector (transects 1-30) depicted by Hovmoller diagram by groups with dissimilarity of 0.263 (transects 1-17), 0.095 (transects 18-20), 0.143 (transects 21-23) and 0.086 (transects 25-30), however, these last three groups are more similar to the transects that make up the second sector. The second sector (transects 31–50) is composed of one group with dissimilarity of 0.086 (transects 31–50). The third sector (transects 51–114, 120-194) is composed of three groups with dissimilarity of 0.091 (transects 51–114), 0.106 (transects 120–154) and 0.097 (transects 155–194). The fourth sector (transects 115-119) is composed of one group with dissimilarity of 0.085 (transects 116-119). And the fifth sector of three groups with dissimilarity of 0.082 (transects 195-214), 0.100 (transects 215-216) and 0.151 (transects 218-254), however, this first and third group is more like the transects that make up with the third sector.

Table 4. Shoreline behavior statistics for Pontal-Itapoá sectors. EPR: End Point Rate; LRR: Linear Regression Rate; CI (95%): Confidence interval for LRR at 95% of confidence level.

<i>Beach system</i>	<i>Sector</i>	<i>EPR (m/year)</i>	<i>LRR (m/year)</i>	<i>CI (95%)</i>	<i>Classification</i>
<i>Pontal-Itapoá</i>	5	0.70	0.00	0.19	Stable
	4	1.35	0.84	0.29	-
	3	-0.18	-0.90	0.18	Eroded
	2	-0.85	-1.61	0.31	Critically Eroded
	1	-0.04	-0.23	0.07	Stable

3.5 DISCUSSION

The results of this study shows the occurrence of sedimentary pulses on the Enseada and Forte beaches, which starts from the headlands; the propagation of these pulses along the Enseada beach and Forte-Capri beach system; the direction of longshore sediment transport northwards in Enseada and Ubatuba beaches and towards the Babitonga bay in Forte-Capri beach system; In Pontal-Itapoá beach system was identified a divergence area of the longshore sediment transport; Also, was identified significant erosion trends on the boundary of Ponta do Sumidouro and Forte beach, at second sector of Forte-Capri beach system, with LRR of -4.11 m/year (CI = ± 0.59 m/year), at the second and third sector of Pontal-Itapoá beach system with LRR of -1.61 m/year (CI = ± 0.31 m/year) and -0.90 m/year (CI = ± 0.18 m/year), respectively. The main findings of this study are summarized in Figure 5.

The hierarchical clustering analysis reflects the disparities in behavior observed in the Hovmoller diagram between the sectors of the Enseada-Itaguaçu and Forte-Capri beach systems with a single dissimilarity value. While, for Pontal-Itapoá beach system, this analysis didn't show the same efficiency, been necessary a more detailed analysis of each branch of the dendrogram. Therefore, each sector of Pontal-Itapoá beach system has groups formed by different dissimilarity values. The effectiveness of the hierarchical clustering in this system may have been hampered by the large number of transects analyzed in a single procedure and by the low variability of the position of the shoreline along the transects, mainly in the straight area of the system (transects 51-254).

Despite the LLR in the second sectors of Forte-Capri and Pontal-Itapoá beach systems been classified with critically eroded shoreline change status, with change rate < -1 m/year, both sector's data series shows that it has non-linear behavior (Figure 5). They have different change rates over the years. As shown by Genz *et al.* (2007) and Hapke *et al.* (2011), linear regression fails to recognize the potential for temporal differences in trend (trend reversals) and accelerations or decelerations. Therefore, these sectors present periods more erosive, stable or depositional rate than the change rate resulting from LRR for the entire data series period.

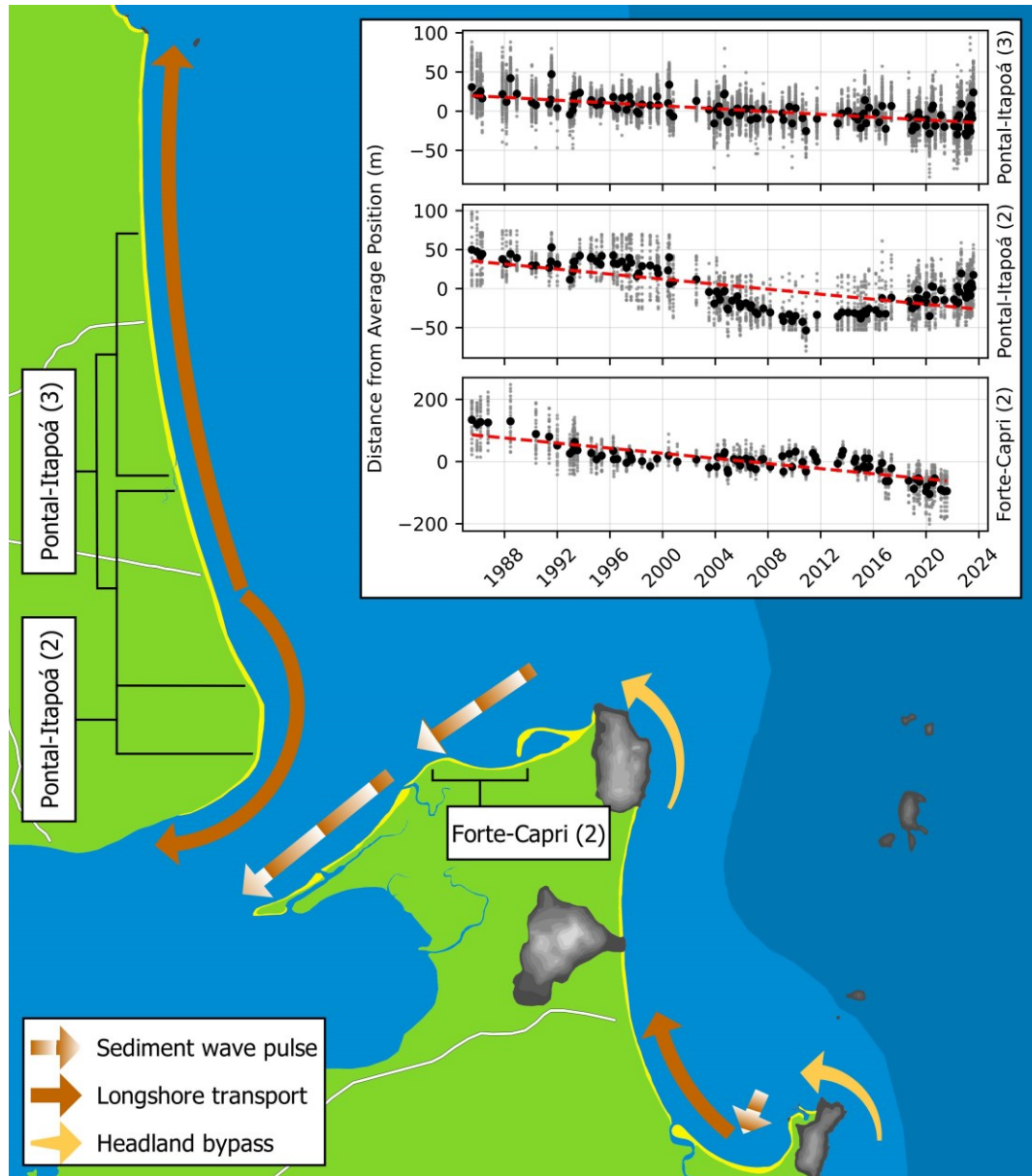


Figure 5. Main findings of this study: Sediment wave pulses from the headland bypass; Longshore sediment transport direction; Headland sediment bypassing at Morro da Enseada and Morro João Dias; Plot of the evolution of the position of the coastline in the second sector of the Forte-Capri (2) and Pontal-Itapoá (2) beach systems and the third sector of the Pontal-Itapoá (3) beach system. The variation in the position of the shoreline of the sectors is expressed as a function of their distance from their average position throughout the data series. The red dashed line represents the linear regression of the sector data series.

According to the literature, there is a sedimentary input provided by the headland bypass in Enseada-Itaguaçu and Forte-Capri beach systems (Abreu, 2011; Camargo, 2020; Costa *et al.*, 2019). The first sector of Enseada-Itaguaçu beach system is protected from the most energetic swells coming from southeast because it is in the shadow region of the Morro da Enseada headland (Klein *et al.*, 2022). This

headland has a considerable projection over the ocean, reaching depths up to 10 m and the depth of closure of the up-drift beach of Morro da Enseada headland is around 9 m (Abreu, 2011). However, several factors suggest that the sedimentary input to the system comes from the headland bypass: Bathymetric surveys on up-drift beach of Morro da Enseada headland showed significant morphological and volumetric variations at the site up to 15 m depth (Abreu, 2011); The up-drift beach of Morro da Enseada headland has records of bottom current speeds to north (towards Enseada beach), in order of 0.40 cm/s, between depths of 10 and 11 m, which would be sufficient to transport the characteristic sediment of the area (Abreu, 2011); Occurrence of suspended plumes of sediment towards Enseada beach and south of Ubatuba beach (Abreu, 2011); Siltation of the port structure built at the south limit of Enseada beach (Abreu, 2011; Camargo, 2020).

Short (2000) and Klein *et al.* (2020) describe the headland sediment bypass occurs in a pulsating manner in response to oscillations in the wave regime and can extend to depths beyond the surf zone. According to the authors, the process is marked by consecutive phases of greater and lesser transport intensity, with particle displacement being favored during waves regime with high energy and period.

The Hovmoller diagram shows a pulsating behavior of the sedimentary input similarly to the described in the literature (Short, 2000; Klein *et al.*, 2020) in the aerial part of the first sector of Enseada-Itaguaçu beach system. There is an interleaving of erosional and depositional states in the shoreline position on interannual scales, with periods of approximately two years. This variation in the position of the shoreline may be associated with the perpendicular shoals observed by bathymetric surveys carried out on the beach (Abreu, 2011). Abreu (2011) defines the waves diffraction in Morro da Enseada headland and the current resulting from this process as the determining agent for the coalescence of this sedimentary material to the Enseada-Ubatuba beach system.

Abreu (2011) and Camargo (2020), analyzing aerial and satellite images of the region from 1938, 1957, 1966, 1978, 1994 and 2014, noted a trend of shoreline retreat on Enseada beach, attributing the hard structures installed in 70s along the shore (the first sector of Enseada-Itaguaçu comprises the entire shoreline that presents hard structures) and port structures as the cause of this process. The authors show that the beach had a greater variation in the position of the shoreline prior to the anthropogenic interventions, mainly towards the sea. After the anthropogenic interventions, the port

structures began to retain the sediment that would go to Enseada beach and the longshore hard armoring limit the retrogradation of the shoreline. As a result of the sediment deficit and the installation of the hard structures, there are periods when the area has no subaerial beach, depending on the availability of the sediment pulses from the headland sediment bypass.

Like the first sector of Enseada-Ubatuba beach system, the pulsating behavior of sediment input was observed in the first sector of Forte-Capri beach system. This sector is also protected from the most energetic southeasterly swells, in the shadow of Morro João Dias headland (Klein *et al.*, 2022). The sediment input from the Morro João Dias headland bypass is characteristic of the “surf zone/nearshore headland bypass” conceptual model proposed by Klein *et al.* (2020). In this process, the sediment transport occurs mostly within the closure depth, creating a sandy spit anchored at the headland in the down drift side of the headland, that’s eventually coalesce on the beach, following the longshore sediment transport and providing pulses of sediment to the system.

Camargo (2020), monitoring the subaerial morphology of the sand spit at Forte beach from June 2016 to August 2017, found the greatest volumetric sediment variation (376,760 m³) between the September 2016 and August 2017 surveys. The data presented in this work corroborates the author’s results, showing an increase in its length and projection towards the main channel of Babitonga bay inlet for the same period.

Costa *et al.* (2019) developed a numerical model of sediment transport between the Enseada-Itaguaçu and Forte-Capri beach systems, describing the same processes as the “surf zone/nearshore headland bypass” conceptual model. According to the author, the Morro João Dias headland bypass occurs in such a way that sediment is accumulated to the north of Itaguaçu beach by the littoral drift current and, in conditions of more energetic waves from southeast associated with cold front passages, the sediment is transported and deposited to the north of the Morro João Dias headland. Once there, the sediment is distributed in the Forte-Capri beach system by the hydrodynamic conditions generated by the non-linear interaction between tide and waves, with waves coming from the east-northeast contributing the most to this process. Silveira *et al.* (2012) and Pulling (2023) show in their studies that the sediment deposited on the north of Morro João Dias headland can be transported into Babitonga

bay, as described by Costa *et al.* (2019), or bypass the Babitonga bay inlet reaching Itapoá beach.

The Enseada-Itaguaçu and Forte-Capri beach systems have riverine discharges in the third (Acará river) and fourth sector (hydrological system rear the sand barrier), respectively. Their inlets behave as described by the “inlet migration and spit breaching” conceptual model developed by FitzGerald *et al.* (2000). In this environment, the inlet migrates in the direction of longitudinal sediment transport due to the accumulation of sediment on the sand-spit at up-drift and erosion of the beach down-drift the inlet. The rupture of the sand-spit near the initial position of the inlet can occur due to gradual erosive processes or suddenly in coastal storm events or large river discharges. According to the author, the development of the whole process takes from 5 and 10 years to develop. At the Acará river, is observed two cycles as described by the conceptual model that lasted around eight (1988-1996) and nine (1998-2007) years. In the fourth sector of Forte-Capri beach system, this process is not well defined in Hovmoller diagram, it is only possible to identify the pulses of sand coming from the longshore sediment input.

Regarding trends in shoreline behavior, Camargo (2020), analyzing shorelines extracted from aerial and orbital images, estimated the linear trend of shoreline position using Linear Regression, as in this work (LRR). However, when comparing the results of Table 2, Table 3 and Table 4, with those obtained by the author, there is a great divergence between the LRR values. For Enseada, Ubatuba and Itaguaçu beaches and Forte-Capri and Pontal-Itapoá beach systems, the author found shoreline progradation/retrogradation rate of 4 m/year, -66 m/year, -29 m/year, 5.2 m/year and -50 m/year, respectively, while this study finds values of -0.43 m/year (CI = ± 0.44 m/year), 0.66 m/year (CI = ± 0.28 m/year), 0.40 m/year (CI = ± 0.33 m/year), -4.11 m/year (CI = ± 0.59 m/year), -0.90 m/year (CI = ± 0.18 m/year), for the corresponding sectors, respectively (Table 5).

Table 5. Comparison with the LLR results of the present paper and Camargo (2020).

<i>Beach/beach system</i>	<i>LRR (m/year)</i>	<i>LRR (m/year) Camargo (2020)</i>
<i>Enseada</i>	-0.43	4.00
<i>Ubatuba</i>	0.66	-66.00
<i>Itaguaçu</i>	0.40	-29.00
<i>Forte-Capri</i>	-4.11	5.20
<i>Pontal-Itapoá</i>	-0.90	50.00

Silveira *et al.* (2012), evaluating the effects of the navigation channel dredging at Babitonga bay inlet, analyzed the evolution of the shoreline position at Pontal beach. The authors used aerial images from 1957, 1978, 1995 and 2006 for this proposal and estimated an EPR of 6.7 m/year from 1957 to 1978, -14.7 m/year for 1978-1995 and -9.1 m/year for 1995-2006. The results obtained in this study also show erosive behavior from 1995 to 2006, the only period that coincides between the data analyzed in this study and by the authors. The analyzed area by the authors corresponds to the second sector of the Pontal-Itapoá beach system. When calculating the EPR for the data obtained from CASSIE in terms of annual averages, for the data series representing the second sector of Pontal-Itapoá beach system, for the same period (1995 to 2006), results in EPR equals to -5.27 m/year.

Souza (1999) carried out at least one planialtimetric profile survey in each sector of the Pontal-Itapoá beach system, calculating their respective EPR for the period from August 1996 to June 1998. According to the author, the 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th sectors have an EPR of 0.10, -2.23, -5.80 to -7.38, -4.86 and -4.82 m/year, respectively. While, using the data series obtained by the method applied in this work, these sectors present EPR in terms of annual averages for the same period as the author of 7.19, 4.46, -3.18, -4.42 and 7.64 m/year in 1st, 2nd, 3rd, 4th and 5th sectors, respectively.

The difference between the LRR found in this work and in Camargo (2020), can be assigned to the low temporal resolution of the author's database, covering a wide time scale, 11 observations in 76 years for the Enseada-Itaguaçu beach system, 15 observations in 78 years for the Forte-Capri beach system and 3 observations in 36 years for the Pontal-Itapoá beach system. While this work analyzed 93 observations in 36 years in the Enseada-Itaguaçu beach system, 89 observations over 36 years for the Forte-Capri beach system and 120 observations over 38 years for the Pontal-

Itapoá beach system. According to Zhang *et al.* (2022, 2024), the amount of error associated with the LRR is inversely proportional to the number of observations. The increase in the amount of data demonstrates the robustness acquired for shoreline analysis provided by free programs and public satellite image collections, especially on beaches that do not have constant monitoring, which are the majority of the world's beaches (>99%) (Vitousek *et al.*, 2023). The differences found in the results presented in this study and by Souza (1999) and Silveira *et al.* (2012) are smaller and can be attributed to the uncertainties in the methods and/or the spatial-temporal variations in sampling.

Silveira *et al.* (2012) proposed the conceptual model of sediment transport at Babitonga bay inlet and the surrounding beaches as one of the results of their numerical model. The authors suggested that the sediment bypasses the inlet along terminal lobe and shoals of the ebb tidal, eventually reaches Itapoá beach where there is divergence area of the longitudinal sediment transport. According to the authors, the material transported to the south would again be transported to the terminal lobe and sandbanks of the ebb tide delta upon reaching the inlet, close to Pontal beach, where the orientation of the coastline makes an inflection. We can relate this cycle of sediment transport described by the authors with that observed in the first and second sectors of the Pontal-Itapoá beach system, where there is a reduction in the magnitude of the variation in the position of the coastline from the second to the first sector. This suggests the capture of sediment from the second sector by the ebb tide current, distributing it in the ebb tide delta.

Comparing the authors results, according to the conceptual model proposed by them, the sediments that's bypasses the Babitonga bay inlet reaches the coast at Itapoá beach near transect 150 of the Pontal-Itapoá beach system. In this same area, according to the author, the longitudinal sediment transport diverges. However, the Hovmoller diagram (Figure 4) shows, for the period analyzed, the area where longitudinal sediment transport diverges is close to transect 80, ~3500 m south of the area proposed by the author. The formation of a sandy spit at Palmeiras river inlet, in the fourth sector of the Pontal-Itapoá system beach, indicates the direction longshore sediment transport to north (Souza, 1999), also indicating that the area where the longshore sediment transport diverges is southwards of that proposed by the author (Supplementary material 8).

3.6 CONCLUSION

This study presented the shoreline evolution along ~40 years in three beach systems adjacent to the Babitonga bay inlet. Was used the public collection of satellite images from Landsat in CASSIE platform to identify the waterline as proxy for shoreline position.

This study used a new approach to group shoreline transect data that has similar behavior. The method uses Hierarchical Clustering associated with Hovmoller diagram interpretation. The Hierarchical Clustering method proposed subsidized the data interpretation, showing a better performance to not straight and with greater variability of the shoreline position.

The conducted analysis shows the occurrence of sedimentary pulses on the Enseada and Forte beaches, which starts from the headlands; the propagation of these pulses along the Enseada beach and Forte-Capri beach system; the direction of longshore sediment transport northwards in Enseada and Ubatuba beaches and towards the Babitonga bay in Forte-Capri beach system; In Pontal-Itapoá beach system was identified a divergence area of the longshore sediment transport; Also, was identified significant erosion trends on the boundary of Ponta do Sumidouro and Forte beach, at second sector of Forte-Capri beach system, with LRR of -4.11 m/year ($CI = \pm 0.59$ m/year), at the second and third sector of Pontal-Itapoá beach system with LRR of -1.61 m/year ($CI = \pm 0.31$ m/year) and -0.90 m/year ($CI = \pm 0.18$ m/year), respectively. The remaining sectors embodying beach environments were classified as stable state.

Given the progressive increase in coastal hazards associated with coastal erosion and the importance of Babitonga bay in the context of the Brazilian port system, as well as the growing interest in the influence of the dredging of the Babitonga bay navigation channel on the sediment balance at Itapoá beach, this study contributes to the understanding of coastal sediment dynamics in the region, and can contribute to future research and development of coastal management strategies, as well as supporting coastal engineering projects.

4 DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo mostram a ocorrência de pulsos sedimentares nas praias da Enseada e Forte, que se propagam a partir dos promontórios; a propagação destes pulsos ao longo da praia da Enseada e do sistema praial Forte-Capri; a direção do transporte sedimentar longitudinal para norte nas praias da Enseada e Ubatuba e para o interior da baía da Babitonga no sistema praial Forte-Capri; No sistema praial Pontal-Itapoá foi identificada uma área de divergência do transporte sedimentar longitudinal; Também foram identificadas tendências significativas de erosão no limite da praial Ponta do Sumidouro e da praia do Forte, no segundo setor do sistema praial Forte-Capri, com LRR de $-4,11$ m/ano (IC = $\pm 0,59$ m/ano), no segundo e terceiro setor do sistema praial Pontal-Itapoá com LRR de $-1,61$ m/ano (IC = $\pm 0,31$ m/ano) e $-0,90$ m/ano (IC = $\pm 0,18$ m/ano), respetivamente. Os resultados principais deste estudo constam na Figura 6.

A análise de agrupamento hierárquico reflete as disparidades do comportamento da linha de costa observadas no diagrama de Hovmoller entre os setores dos sistemas praias Enseada-Itaguaçu e Forte-Capri. No entanto, a análises não apresenta a mesma eficiência para o sistema praial Pontal-Itapoá, sendo necessário uma análise detalhada para cada ramo do dendrograma. Desta forma, cada setor do sistema praial Pontal-Itapoá apresentou grupos formados por diferentes valores de dissimilaridade. A eficácia da análise de agrupamento hierárquico para a setorização deste último sistema pode ter sido prejudicada pelo grande número de transectos analisados em um único procedimento e pela baixa variabilidade da posição da linha de costa, principalmente nas áreas onde a linha de costa é retilínea (transectos 51-254).

Apesar da LLR nos segundos setores dos sistemas praias do Forte-Capri e Pontal-Itapoá terem sido classificadas com o *status* de criticamente erodida (< -1 m/ano), as séries de dados de ambos os setores mostram que ela tem comportamento não linear (Figura 6). Como demonstrado por Genz *et al.* (2007) e Hapke *et al.* (2011), a regressão linear não reconhece diferenças temporais na tendência (reversões de tendência), assim como acelerações ou desacelerações. Portanto, estes setores apresentam períodos com taxa de erosão, deposição ou estabilidade diferentes da taxa resultante da LRR para todo o período da série de dados.

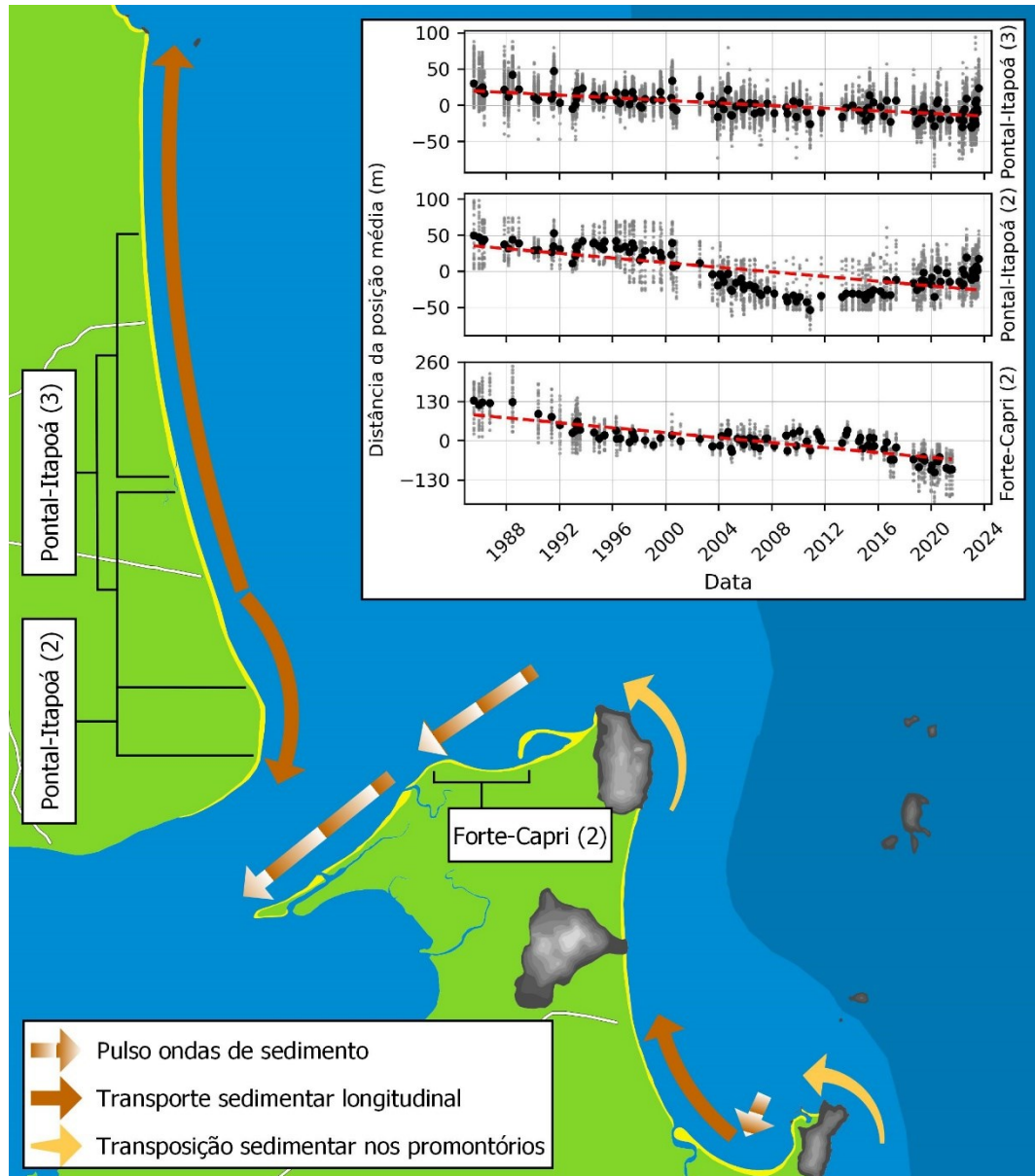


Figura 6. Principais resultados deste estudo: Pulsos de ondas de sedimentos provenientes da transposição de sedimentos nos promontórios; Direção do transporte sedimentar longitudinal nos sistemas praias; Transposição sedimentar nos promontórios do Morro da Enseada e do Morro João Dias; Gráfico da evolução da posição da linha de costa no segundo setor dos sistemas praias Forte-Capri (2) e Pontal-Itapoá (2) e do terceiro setor do sistema praias Pontal-Itapoá (3). A variação da posição da linha de costa dos setores está expressa função da sua distância em torno de sua posição média ao longo da série de dados. A linha tracejada vermelha representa a regressão linear da série de dados dos setores.

De acordo com a literatura, há aporte sedimentar fornecido pela transposição sedimentar através dos promontórios rochosos nos sistemas praias Enseada-Itaguaçu e Forte-Capri (Abreu, 2011; Camargo, 2020; Costa *et al.*, 2019). O primeiro setor do sistema praias Enseada-Itaguaçu é protegido das ondulações mais

energéticas vindas de sudeste por estar na região de sombra do promontório do Morro da Enseada (Klein *et al.*, 2022). Este promontório tem projeção considerável sobre o oceano, atingindo profundidades de até 10 m e a profundidade de fechamento da praia a montante do promontório do Morro da Enseada é de cerca de 9 m (Abreu, 2011). No entanto, vários fatores sugerem que o aporte sedimentar do sistema provém da transposição sedimentar no promontório: Levantamentos batimétricos na praia à montante do promontório do Morro da Enseada mostraram variações morfológicas e volumétricas significativas no local, em profundidades de até 15 m (Abreu, 2011); A praia à montante do promontório do Morro da Enseada tem registros de velocidades de corrente de fundo para norte (em direção à praia da Enseada), na ordem de 0,40 cm/s, entre as profundidades de 10 e 11 m, o que seria suficiente para transportar os sedimentos característicos da área (Abreu, 2011); Ocorrência de plumas de sedimentos em suspensão em direção à praia da Enseada e ao sul da praia de Ubatuba (Abreu, 2011); Assoreamento da estrutura portuária construída no limite sul da praia da Enseada (Abreu, 2011; Camargo, 2020).

Short (2000) e Klein *et al.* (2020) descrevem que a transposição sedimentar em promontórios ocorre de forma pulsante em resposta as oscilações no regime de ondas e pode estender-se a profundidades para além da zona de arrebentação. De acordo com os autores, o processo é marcado por fases consecutivas de maior e menor intensidade de transporte sedimentar, sendo o deslocamento de partículas favorecido durante o regime de ondas com elevada energia e período.

O diagrama de Hovmoller mostra o comportamento pulsante do aporte sedimentar similar ao descrito na literatura (Short, 2000; Klein *et al.*, 2020) na parte aérea do primeiro setor do sistema praias Enseada-Itaguaçu. Há uma intercalação de estados erosivos e deposicionais na posição da linha de costa em escalas interanuais, com períodos de aproximadamente dois anos. Essa variação na posição da linha de costa pode estar associada à bancos perpendiculares à costa observados por levantamentos batimétricos (Abreu, 2011). Abreu (2011) define a difração das ondas no promontório do Morro da Enseada e a corrente resultante desse processo como o agente determinante para a coalescência do material sedimentar no sistema praias Enseada-Ubatuba.

Abreu (2011) e Camargo (2020), analisando imagens aéreas e de satélite da região dos anos de 1938, 1957, 1966, 1978, 1994 e 2014, observaram uma tendência de retrogradação da linha de costa na praia da Enseada, atribuindo às estruturas

rígidas (enrocamento) instaladas na década de 70 ao longo da orla (em todo o primeiro setor do sistema praias Enseada-Itaguaçu) e às estruturas portuárias como causa desse processo. Os autores mostram que a praia apresentava maior variação na posição da linha de costa antes das intervenções antrópicas, principalmente em direção ao mar. Após as intervenções antropogênicas, as estruturas portuárias passaram a reter os sedimentos que iriam para a praia da Enseada e o enrocamento limitou a retração da linha de costa. Como resultado do déficit sedimentar e da instalação das estruturas rígidas, há períodos em que o setor não apresenta praia subaérea, a depender dos pulsos sedimentares provenientes da transposição sedimentar pelo promontório.

Assim como no primeiro setor do sistema praias Enseada-Ubatuba, o comportamento pulsante do aporte sedimentar foi observado no primeiro setor do sistema praias Forte-Capri. Esse setor também está protegido das ondulações mais energéticas de sudeste, na sombra do promontório do Morro João Dias (Klein *et al.*, 2022). O aporte sedimentar proveniente da transposição sedimentar no promontório do Morro João Dias é característico do modelo conceitual "*surf zone/nearshore headland bypass*" proposto por Klein *et al.* (2020). Neste processo, o transporte de sedimentos ocorre principalmente dentro da profundidade de fechamento, criando um esporão arenoso ancorado ao promontório, a sua jusante, que eventualmente coalesce à praia do Forte e Ponta do Sumidouro, seguindo o transporte sedimentar longitudinal e fornecendo pulsos de sedimentos para o sistema.

Camargo (2020), monitorando a morfologia subaérea do esporão arenoso da praia do Forte, no período de junho de 2016 a agosto de 2017, encontrou a maior variação volumétrica de sedimentos (376.760 m³) entre os levantamentos de setembro de 2016 e agosto de 2017. Os dados apresentados neste trabalho corroboram com os resultados do autor, mostrando um aumento no seu comprimento e projeção em direção ao canal principal da desembocadura da baía da Babitonga para o mesmo período.

Costa *et al.* (2019) desenvolveram um modelo numérico do transporte de sedimentos entre os sistemas praias Enseada-Itaguaçu e Forte-Capri, descrevendo os mesmos processos do modelo conceitual "*surf zone/nearshore headland bypass*". Segundo o autor, a transposição de sedimentos em torno do promontório do Morro João Dias ocorre de forma que os sedimentos são acumulados no norte da praia de Itaguaçu pela ação da corrente de deriva litorânea e, em condições de ondas mais

energéticas de sudeste associadas a passagens de frentes frias, os sedimentos são transportados e depositados ao norte do promontório do Morro João Dias. Uma vez lá, o sedimento é distribuído no sistema praias Forte-Capri pelas condições hidrodinâmicas geradas pela interação não linear entre a maré e ondas, sendo as ondas vindas de leste-nordeste as que mais contribuem para esse processo. Silveira *et al.* (2012) e Pulling (2023) mostram em seus estudos que o sedimento depositado ao norte do promontório do Morro João Dias pode ser transportado para a baía da Babitonga, como descrito por Costa *et al.* (2019), ou transpor o canal da desembocadura da baía da Babitonga chegando à praia de Itapoá.

Os sistemas praias Enseada-Itaguaçu e Forte-Capri têm descargas fluviais no terceiro (rio Acaraí) e quarto setor (sistema hidrológico à retaguarda da barra arenosa), respectivamente. Suas desembocaduras se comportam conforme descrito pelo modelo conceitual “*inlet migration and spit breaching*” desenvolvido por FitzGerald *et al.* (2000). Neste ambiente, a desembocadura migra na direção do transporte longitudinal de sedimentos devido ao acúmulo de sedimentos no esporão arenosa, formado à montante da desembocadura, e à erosão da praia à jusante da desembocadura. A ruptura da barra arenosa na posição inicial da desembocadura pode ocorrer devido a processos erosivos graduais ou subitamente em eventos de tempestade costeira ou grandes descargas fluviais. Segundo o autor, todo esse processo pode levar de 5 a 10 anos para se desenvolver. No rio Acaraí, são observados dois ciclos, conforme descrito pelo modelo conceitual, que duraram cerca de oito (1988-1996) e nove (1998-2007) anos. No quarto setor do sistema praias Forte-Capri, este ciclo não está bem definido no diagrama de Hovmoller, apenas é possível identificar os pulsos de areia provenientes do aporte sedimentar longitudinal.

Em relação às tendências do comportamento da linha de costa, Camargo (2020) ao analisar as linhas de costa extraídas de imagens aéreas e orbitais, estimou a tendência linear da posição da linha de costa utilizando Regressão Linear, assim como neste trabalho (LRR). Porém, ao comparar os resultados obtidos, verifica-se uma grande divergência entre os valores de LRR. Para as praias da Enseada, Ubatuba e Itaguaçu e para os sistemas praias Forte-Capri e Pontal-Itapoá, o autor encontrou taxas de progradação/retrogradação da linha de costa de 4 m/ano, -66 m/ano, -29 m/ano, 5,2 m/ano e -50 m/ano, respectivamente, enquanto este estudo encontrou valores de -0,43 m/ano (IC = $\pm 0,44$ m/ano), 0,66 m/ano (IC = $\pm 0,28$ m/ano),

0,40 m/ano (IC = $\pm 0,33$ m/ano), -4,11 m/ano (IC = $\pm 0,59$ m/ano), -0,90 m/ano (IC = $\pm 0,18$ m/ano), para os sectores correspondentes, respetivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Comparação entre a LRR resultante do presente trabalho e do Camargo (2020).

<i>Beach/beach system</i>	<i>LRR (m/year)</i>	<i>LRR (m/year) Camargo (2020)</i>
<i>Enseada</i>	-0.43	4.00
<i>Ubatuba</i>	0.66	-66.00
<i>Itaguaçu</i>	0.40	-29.00
<i>Forte-Capri</i>	-4.11	5.20
<i>Pontal-Itapoá</i>	-0.90	50.00

Silveira *et al.* (2012) ao avaliar os efeitos da dragagem do canal de navegação da desembocadura da baía da Babitonga, analisaram a evolução da linha de costa na praia do Pontal. Os autores utilizaram imagens aéreas de 1957, 1978, 1995 e 2006 para essa proposta e estimaram EPR de 6,7 m/ano de 1957 a 1978, -14,7 m/ano para 1978-1995 e -9,1 m/ano para 1995-2006. Os resultados obtidos neste estudo também mostram comportamento erosivo de 1995 a 2006, único período coincidente com os dados analisados pelos autores. A área analisada pelos autores corresponde ao segundo setor do sistema praiial Pontal-Itapoá. Ao calcular a EPR para os dados obtidos do CASSIE em termos de médias anuais, para a série de dados que representa o segundo setor do sistema praiial Pontal-Itapoá, para o mesmo período (1995 a 2006), a EPR resultante é de -5,27 m/ano.

Souza (1999) realizou pelo menos um levantamento de perfil planialtimétrico em cada setor do sistema praiial Pontal-Itapoá, calculando suas respectivas EPR para o período de agosto de 1996 a junho de 1998. Segundo a autora, o 1º, 2º, 3º, 4º e 5º setor apresentam EPR de 0,10, -2,23, -5,80 a -7,38, -4,86 e -4,82 m/ano, respetivamente. Enquanto neste trabalho, o EPR em termos de médias anuais para o mesmo período que o investigado pela autora, apresentam as seguintes taxas: 7,19, 4,46, -3,18, -4,42 e 7,64 m/ano no 1º, 2º, 3º, 4º e 5º sector, respetivamente.

A diferença entre os resultados encontrados de LRR neste trabalho e pelo Camargo (2020), pode ser atribuída à baixa resolução temporal e a ampla escala temporal da sua base de dados, 11 observações em 76 anos para o sistema praiial Enseada-Itaguaçu, 15 observações em 78 anos para o sistema praiial Forte-Capri e 3 observações em 36 anos para o sistema praiial Pontal-Itapoá. Enquanto o presente

trabalho analisou 93 observações em 36 anos no sistema praial Enseada-Itaguaçu; 89 observações em 36 anos para o sistema praial Forte-Capri; e 120 observações em 38 anos para o sistema praial Pontal-Itapoá. De acordo com Zhang *et al.* (2022, 2024), o erro associado à LRR é inversamente proporcional ao número de observações. Este incremento na quantidade de dados demonstra a robustez adquirida para análise da linha de costa proporcionada pelos programas livres e coleções de imagens de satélite públicas, principalmente em praias que não possuem monitoramento constante, que são a maioria das praias do mundo (>99%) (Vitousek *et al.*, 2023). As diferenças encontradas nos resultados apresentados neste estudo e por Souza (1999) e Silveira *et al.* (2012) são menores, as diferenças podem ser atribuídas às incertezas metodológicas e/ou às variações espaço-temporais da amostragem.

Silveira *et al.* (2012) propuseram um modelo conceitual do transporte sedimentar na desembocadura da baía da Babitonga e nas praias do entorno como um dos resultados de seu modelo numérico. Os autores sugerem que o sedimento que transpõem a desembocadura da baía através do lobo terminal e dos bancos arenosos do delta de maré vazante, eventualmente atinge a praia de Itapoá onde há uma zona de divergência do transporte sedimentar longitudinal. Segundo os autores, o material transportado para sul, seriam novamente transportados para o lobo terminal e bancos de areia do delta de maré vazante ao atingir o canal da desembocadura, nas proximidades da praia do Pontal, onde a orientação da linha de costa faz uma inflexão. Podemos relacionar este ciclo do transporte sedimentar descrito pelos autores com o observado no primeiro e segundo setor do sistema praial Pontal-Itapoá, onde há uma redução da magnitude da variação da posição da linha de costa do segundo para o primeiro setor. O que sugere a captura do sedimento proveniente do segundo setor pela corrente de maré vazante, distribuindo-o no delta de maré vazante.

Ainda comparando os resultados dos autores, segundo o modelo conceitual por eles proposto, os sedimentos que traspõem a desembocadura da baía da Babitonga atingem a costa na praia de Itapoá, próximo ao transecto 150 do sistema praial Pontal-Itapoá. Nesta mesma área, segundo o autor, o transporte longitudinal de sedimentos diverge. No entanto, o diagrama de Hovmoller (Figure 4) mostra, para o período analisado, que a área onde o transporte longitudinal de sedimentos diverge é próxima ao transecto 80, ~3500 m ao sul da área proposta pelo autor. A formação de um esporão arenoso na desembocadura do rio Palmeiras, no quarto setor do sistema praial Pontal-Itapoá, sugere que a direção do transporte longitudinal de sedimentos é

para norte (Souza, 1999), também indicando que a área onde o transporte sedimentar longitudinal diverge é ao sul da proposta pelo autor (Material complementar 8).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou a evolução anos da linha de costa dos últimos ~40 anos em três sistemas de praias no entorno da desembocadura da baía da Babitonga. Foi utilizado imagens públicas de satélite da missão Landsat através da plataforma CASSIE para extrair a linha d'água como indicador da posição da linha de costa.

Este estudo utilizou uma nova abordagem para agrupar dados de transectos da linha de costa que apresentam comportamento semelhante. O método utiliza Clusterização Hierárquica associada à interpretação do diagrama de Hovmoller. A Clusterização Hierárquica proposta subsidiou a interpretação dos dados, mostrando melhor desempenho em sistemas de praias não lineares e com maior variabilidade da posição da linha de costa.

A análise conduzida mostra a ocorrência de pulsos sedimentares nas praias da Enseada e do Forte que são provenientes dos promontórios; a propagação desses pulsos ao longo da praia da Enseada e do sistema praias do Forte-Capri; a direção do transporte sedimentar longitudinal para norte nas praias da Enseada e Ubatuba e em direção à baía da Babitonga no sistema praias Forte-Capri; no sistema praias Pontal-Itapoá foi identificada uma área de divergência do transporte sedimentar longitudinal; Foram identificadas tendências significativas de erosão no limite da Ponta do Sumidouro com a praia do Forte, no segundo setor do sistema praias Forte-Capri, com LRR de -4.11 m/ano (IC = $\pm 0,59$ m/ano), no segundo e terceiro setor do sistema praias Pontal-Itapoá com LRR de $-1,61$ m/ano (IC = $\pm 0,31$ m/ano) e $-0,90$ m/ano (IC = $\pm 0,18$ m/ano), respectivamente. Os demais sectores de ambientes praias foram classificados como estáveis.

Dado o aumento progressivo dos perigos costeiros associados à erosão costeira e a relevância da baía da Babitonga no contexto do sistema portuário brasileiro, assim como o crescente interesse sobre a influência da dragagem do canal de navegação da baía da Babitonga sobre o balanço sedimentar na praia de Itapoá, este trabalho contribui para a compreensão da dinâmica sedimentar costeira na região, podendo contribuir para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento costeiro, além de embasar projetos de engenharia costeira.

REFERÊNCIAS

ABREU, J. J. de. **Transporte sedimentar longitudinal e morfodinâmica praial: Exemplo do litoral norte de Santa Catarina**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

ABREU, J. J. de; GRÉ, J. C. R. Beach morphodynamics and sediment transport along the northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. ICS 2004, n. SI 39, p. 1756–1761, 2006.

ALMEIDA, L. P.; OLIVEIRA, I. E. de ; LYRA, R.; DAZZI, R. L. S.; MARTINS, V. G.; KLEIN, A. H. da F. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): Shoreline management module. **Environmental Modelling & Software**, v. 140, n. 105033, 13 mar. 2021.

ALVES, J. H. G. de M. **Refração do espectro de ondas oceânicas em águas rasas: Aplicações a região costeira de São Francisco do Sul, SC**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C. de. Geological map of the coastal plain between the Saí-Guaçu river and São Francisco bay, northern coast of the State of Santa Catarina. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, 2004.

ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C. de; LAMOUR, M. R. **Coastal erosion problems induced by dredging activities in the navigation channel of Paranaguá and São Francisco do Sul harbor, Southern Brazil**. International Coastal Symposium. 2006.

ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. **Wave regime characteristics of the Southern Brazil**. International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. 2003.

BAR-JOSEPH, Z., GIFFORD, D. K. & JAAKKOLA, T. S. 2001. Fast optimal leaf ordering for hierarchical clustering. **Bioinformatics**. 2001.

BISHOP-TAYLOR, R.; NANSON, R.; SAGAR, S.; LYMBURNER, L. Mapping Australia's dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 267, n. 112734, 2021.

BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: A review. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 4, p. 688–703, 2005.

BURNINGHAM, H.; FRENCH, J. Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. **Geomorphology**, v. 282, p. 131–149, 2017.

CAMARGO, J. M. de. **Litoral do estado de Santa Catarina, Brasil: promontórios rochosos, comportamento da linha de costa e processo de transposição sedimentar**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

CASTELLE, B.; MASSELINK, G.; SCOTT, T.; KONSTANTINOU, A.; LUIJENDIJK, A.; KRAS, E. Satellite-derived sandy shoreline trends and interannual variability along the Atlantic coast of Europe. **Research Square [Preprint]**, 2023.

CASTELLE, B.; RITZ, A.; MARIEU, V.; LERMA, A. N.; VANDENHOVE, M. Primary drivers of multidecadal spatial and temporal patterns of shoreline change derived from optical satellite imagery. **Geomorphology**, v. 413, n. 108360, 2022.

COSTA, W. L. L.; SILVEIRA, L. F.; KLEIN, A. H. da F. **Influence of wave climate and tidal regime on headland bypassing - study case: Northern São Francisco do Sul Island, SC, Brazil** 9th International Conference on Coastal Sediments 2019.

DABEES, M.; KAMPHUIS, J. W. **Online, a numerical model for shoreline change** Coastal Engineering Proceedings 1998

FENSTER, M. S.; DOMINGUEZ, R. Quantifying coastal storm impacts using a new Cumulative Storm Impact Index (CSII) model: Application along the Virginia coast, USA. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 127, n. 9, 2022.

FITZGERALD, D. M.; KRAUS, N. C.; HANDS, E. B. Natural mechanisms of sediment bypassing at tidal Inlets. **Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note**, v. 4, n. 30, p. 1–10, 2000.

GALVÃO, W. F. L.; KLEIN, A. H. da F.; MAHIQUES, M. M. de; HEIN, C. J.; SOUSA, L. A. P. de; COOPER, A.; GREEN, A. Holocene barrier overstepping, estuarine rollover and drainage merging in a sub-tropical bay. **Marine Geology**, v. 462, 2023.

GENZ, A. S.; FLETCHER, C. H.; DUNN, R. A.; FRAZER, L. N.; ROONEY, J. J. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. **Journal of Coastal Research**, v. 231, n. 1, p. 87–105, 2007.

HAGENAARS, G.; VRIES, S. de; LUIJENDIJK, A. P.; BOER, W. P. de; RENIERS, A. J. H. M. On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the Sand Motor mega-scale nourishment. **Coastal Engineering**, v. 133, p. 113–125, 2018.

HANSLOW, D. J. Beach erosion trend measurement: A comparison of trend indicators. **Journal of Coastal Research**, v. 50, n. SI, p. 588–593, 2007.

HANSON, H. GENESIS: A generalized shoreline change numerical model. **Journal of Coastal Research**, v. 5, n. 1, p. 1–27, 1989.

HAPKE, C. J.; HIMMELSTOSS, E. A.; KRATZMANN, M. G.; LIST, J. H.; THIELER, E. R. **National assessment of shoreline change; historical shoreline change along the New England and Mid-Atlantic coasts** U.S. Geological Survey OpenFile Report. [s.l: s.n.].

HORN-FILHO, N. O. **O Quartenário costeira da ilha de São Francisco do Sul e arredores, Nordeste do Estado de Santa Catarina - aspectos geológicos, evolutivos e ambientais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

HOVMÖLLER, E. The Trough-and-Ridge diagram. **Tellus**, 1(2), 62–66, 1949.

KLEIN, A. H. da F.; ALMEIDA, L. P. M.; FILIPPI, B.; PINTO, M. W.; GALVÃO, W. F. L.; COSTA, W. L. L.; DALINGHAUS, C.; PRADO, M. F. V. **Subida do nível do mar e a Babitonga: uma abordagem eco-morfodinâmica para prever e mitigar impactos**. 2024.

KLEIN, A. H. da F.; SHORT, A. D.; BONETTI, J. Santa Catarina Beach Systems. *Em*: SHORT, A. D; KLEIN, A. H. F. **Brazilian beach systems**. Cham: Springer, 2016. p. 465–506.

KLEIN, A. H. da F.; SILVA, G. V. da; TABORDA, R.; SILVA, A. P. da; SHORT, A. D. Headland bypassing and overpassing: Form, processes and applications. *Em*: JACKSON, D. W. T.; SHORT, A. D. **Sandy Beach Morphodynamics**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 557–591.

LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The state of the world's beaches. **Scientific Reports**, v. 8, n. 6641, 27, 2018.

MENTASCHI, L.; VOUSDOKAS, M. I.; PEKEL, J. F.; VOUKOUVALAS, E.; FEYEN, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. **Scientific Reports**, v. 8, n. 12876, p. 1–11, 2018.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histogram. **IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979.

PULLING, M. C. **Evolução morfológica da desembocadura da baía da Babitonga, Santa Catarina**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

RANASINGHE, R.; MCLOUGHLIN, R.; SHORT, A.; SYMONDS, G. The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation. **Marine Geology**, v. 204, n. 3–4, p. 273–287, 2004.

RIBEIRO, M. S. A. **Headland sediment bypassing processes**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2017.

SHORT, A. D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

SHORT, A. D.; TREMBANIS, A. C. Decadal scale patterns in beach oscillation and rotation Narrabeen beach, Australia-time series, PCA and wavelet analysis. **Journal of Coastal Research**, v. 20, n. 2, p. 523–532, 2004.

SILVA, A. P. da; SILVA, G. V. da; STRAUSS, D.; MURRAY, T.; WOORTMANN, L. G.; TABER, J.; CARTWRIGHT, N.; TOMLINSON, R. Headland bypassing timescales: Processes and driving forces. **Science of the Total Environment**, v. 793, p. 148591, 2021.

SILVA, G. V. da; MULER, M.; PRADO, M. F. V.; SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. da F.; TOLDO, E. E. Shoreline change analysis and insight into the sediment transport path along Santa Catarina Island north shore, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 32, n. 4, p. 863–874, 2016.

SILVEIRA, L. F. da; BENEDET, L.; SIGNORIN, M.; BONANATA, R. **Evaluation of the relationship between navigation channel dredging and erosion of adjacent beaches in southern Brazil** Coastal Engineering Proceedings. 2012

SOUZA, M. C. de. **Mapeamento da planície costeira e morfologia e dinâmica costeira das praias do Município de Itapoá, Estado de Santa Catarina: Subsídios à ocupação**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1999.

SOUZA, M. C. de; ÂNGULO, R. J. **Decadal and inter-annual variations of shoreline and beach volumes in Itapoá (Santa Catarina, Brazil)** Proceedings of the Brazilian symposium on sandy beaches: Morphodynamics, ecology, uses, hazards and management. 2003.

SOUZA, M. C. de; ANGULO, R. J.; PESSEDA, L. C. Evolução paleogeográfica da planície costeira de Itapoá, litoral norte de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 2, p. 223–230, 2001.

THIELER, E. R., HIMMELSTOSS, E. A., ZICHICHI, J. L. & ERGUL, A. *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. Reston. 2009.

TOMASI, M. F. Babitonga bay inlet shorelines and adjacent beaches. **Mendeley Data**, v. 1. 2024.

TRUCCOLO, E. C. **Maré meteorológica e forçantes atmosféricas locais em São Francisco do Sul-SC**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F. Marés astronômicas na baía da Babitonga, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 57–66, 1999.

VALVERDE, M. de F. M. M. **Sediment budget estimation using historic cartography: Application to Figueira da Foz coast with 19 th and 20 th centuries shorelines**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2023.

VITOUSEK, S.; BUSCOMBE, D.; VOS, K.; BARNARD, P. L.; RITCHIE, A. C.; WARRICK, J. A. The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. **Cambridge Prisms: Coastal Futures**, v. 1, n. 10, 2023.

VOS, K.; SPLINTER, K. D.; PALOMAR-VÁZQUEZ, J.; PARDO-PASCUAL, J. E.; ALMONACID-CABALLER, J.; CABEZAS-RABADÁN, C.; KRAS, E. C.; LUIJENDIJK, A. P.; CALKOEN, F.; ALMEIDA, L. P.; PAIS, D.; KLEIN, A. H. da F.; MAO, Y.; HARRIS, D.; CASTELLE, B.; BUSCOMBE, D.; VITOUSEK, S. Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. **Communications Earth and Environment**, v. 4, n. 1, 2023.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; SIMMONS, J. A.; TURNER, I. L. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. **Coastal Engineering**, v. 150, p. 160–174, 2019.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; WALKER, A.; TURNER, I. L. Beach slopes from Satellite-Derived Shorelines. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 14, 2020.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; TURNER, I. L.; SPLINTER, K. D. Pacific shoreline erosion and accretion patterns controlled by El Niño/Southern Oscillation. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 2, p. 140–146, 2023.

VOS, K.; SPLINTER, K. D.; HARLEY, M. D.; SIMMONS, J. A.; TURNER, I. L. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. **Environmental Modelling and Software**, v. 122, n. 104528, 2019.

VOUSDOUKAS, M. I.; RANASINGHE, R.; MENTASCHI, L.; PLOMARITIS, T. A.; ATHANASIOU, P.; LUIJENDIJK, A.; FEYEN, L. Sandy coastlines under threat of erosion. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 260–263, 2020.

WARRICK, J. A.; VOS, K.; BUSCOMBE, D.; RITCHIE, A. C.; CURTIS, J. A. A large sediment accretion wave along a northern California littoral cell. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 128, n. 7, 2023.

WILKS, D. S. Cluster Analysis. *Em: Wilks, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Cham: Elsevier, 2011. p. 603-616.

ZHANG X., WU C., ZHANG Y., HU R., YANG Z. Using free satellite imagery to study the long-term evolution of intertidal bar systems. **Coastal Engineering**, v. 174, n. 104123, 2022.

ZHANG, X., WU, C., HU, R., XU, S., XU, Z., & YANG, Z. Can satellite-derived beach images resolve the responses to human activities? **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 129, n. e2023JF007339. 2024

ANEXOS

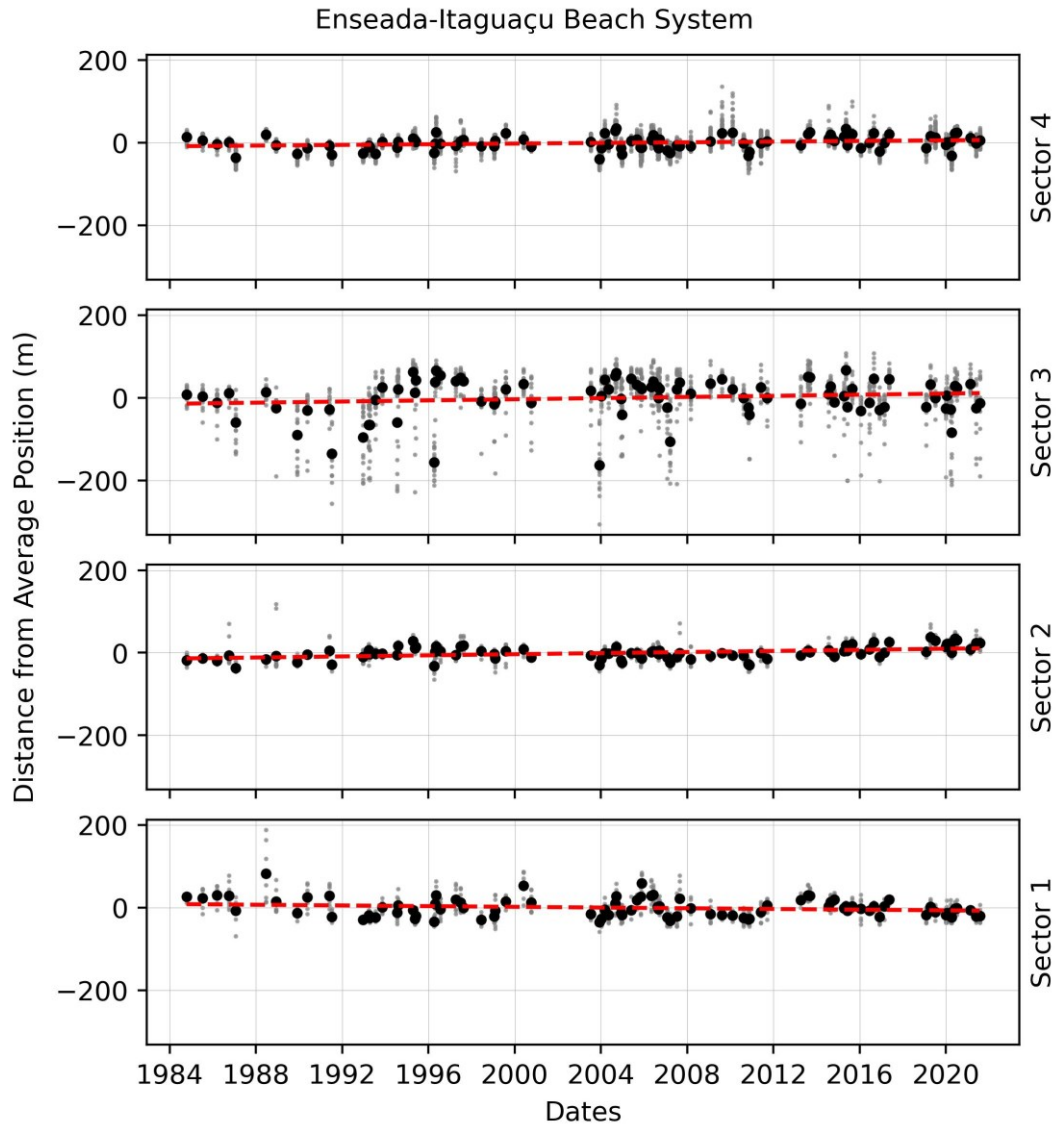
Estão em anexo o material complementar encaminhado junto com o artigo e que foi citado no corpo do texto.

Material complementar 1. Datas e hora das imagens Landsat (UTM) utilizadas neste estudo. (*Supplementary material 1. Landsat Image dates-time (UTM) used in this study.*)

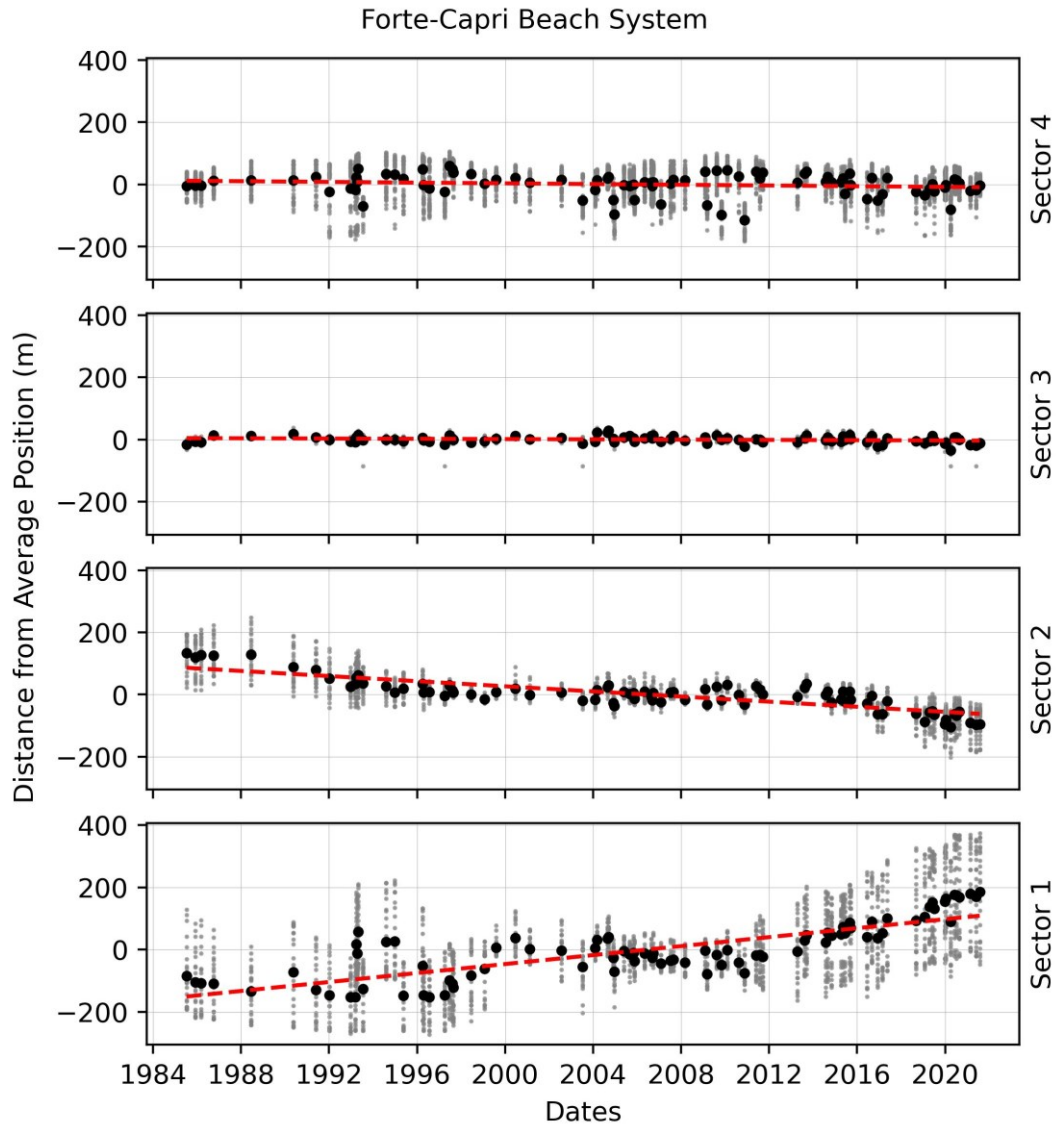
Enseada-Itaguaçu		Forte-Capri		Pontal-Itapoá	
1984-10-10 12:41:25	2010-08-15 13:01:39	1985-07-09 12:41:18	2013-08-07 13:13:20	1985-07-09 12:41:18	2007-03-16 13:06:16
1985-07-09 12:41:18	2010-11-03 13:01:09	1985-11-30 12:39:35	2013-09-08 13:13:21	1985-11-30 11:39:35	2007-08-23 13:04:37
1986-03-06 12:37:34	2010-11-19 13:01:08	1986-03-06 12:37:34	2014-07-25 13:11:13	1986-03-06 11:37:34	2008-03-02 13:01:36
1986-09-30 12:31:24	2011-05-30 13:00:49	1986-09-30 12:31:24	2014-08-26 13:11:24	1986-04-23 12:36:34	2009-02-01 11:56:51
1987-01-20 12:31:11	2011-09-19 12:59:46	1988-06-15 12:41:55	2014-10-29 13:11:29	1987-11-04 11:39:10	2009-03-05 12:57:39
1988-06-15 12:41:55	2013-04-05 13:07:52	1990-05-20 12:31:35	2015-04-07 13:10:42	1988-02-24 12:41:04	2009-08-12 13:00:36
1988-12-08 12:41:46	2013-08-07 13:13:20	1991-05-23 12:33:55	2015-05-09 13:10:24	1988-06-15 12:41:55	2009-10-31 12:01:35
1989-11-25 12:35:18	2013-09-08 13:13:21	1992-01-02 12:35:35	2015-06-10 13:10:35	1988-12-08 11:41:46	2010-02-04 12:02:12
1990-05-20 12:31:35	2014-07-25 13:11:13	1992-12-19 12:32:40	2015-08-29 13:11:08	1990-01-28 11:33:24	2010-08-15 13:01:39
1991-05-23 12:33:55	2014-08-26 13:11:24	1993-03-09 12:33:29	2015-09-14 13:11:15	1990-05-20 12:31:35	2010-11-19 12:01:08
1991-07-10 12:34:32	2014-10-29 13:11:29	1993-03-25 12:33:29	2016-06-12 13:11:01	1991-05-23 12:33:55	2011-09-19 12:59:46
1992-12-19 12:32:40	2015-04-07 13:10:42	1993-04-10 12:33:36	2016-08-31 13:11:31	1991-07-10 12:34:32	2013-04-17 13:13:08
1993-03-25 12:33:29	2015-05-09 13:10:24	1993-04-26 12:33:45	2016-12-05 13:11:39	1991-07-26 12:34:48	2013-08-07 13:13:20
1993-04-10 12:33:36	2015-06-10 13:10:35	1993-07-15 12:33:44	2017-02-23 13:11:13	1992-01-02 11:35:35	2014-01-30 12:12:25
1993-07-15 12:33:44	2015-08-29 13:11:08	1994-08-03 12:28:55	2017-05-14 13:10:45	1992-12-19 11:32:40	2014-07-25 13:11:13
1993-11-04 12:33:23	2016-01-20 13:11:25	1994-12-25 12:24:39	2018-09-06 13:10:55	1993-03-09 12:33:29	2014-10-29 12:11:29
1994-07-18 12:29:23	2016-06-12 13:11:01	1995-05-18 12:18:48	2019-01-28 13:11:07	1993-03-25 12:33:29	2015-01-17 12:11:20
1994-08-03 12:28:55	2016-08-31 13:11:31	1996-04-02 12:19:51	2019-04-18 13:10:46	1993-04-10 12:33:36	2015-02-02 13:11:16
1995-04-16 12:20:14	2016-12-05 13:11:39	1996-04-18 12:20:50	2019-06-05 13:11:05	1993-04-26 12:33:45	2015-04-07 12:10:42
1995-05-18 12:18:48	2017-02-23 13:11:13	1996-07-23 12:26:09	2019-07-07 13:11:15	1993-09-17 12:33:40	2015-05-09 13:10:24
1995-06-03 12:18:03	2017-05-14 13:10:45	1997-04-05 12:38:18	2019-12-30 13:11:33	1994-07-18 12:29:23	2015-06-10 13:10:35
1996-04-02 12:19:51	2019-01-28 13:11:07	1997-06-24 12:41:05	2020-01-15 13:11:30	1994-08-03 12:28:55	2015-08-29 13:11:08
1996-04-18 12:20:50	2019-04-18 13:10:46	1997-08-11 12:42:42	2020-04-04 13:11:00	1994-12-25 11:24:39	2016-03-08 13:11:12
1996-05-04 12:21:47	2019-07-07 13:11:15	1997-08-27 12:43:12	2020-06-07 13:10:54	1995-04-16 12:20:14	2016-06-12 13:11:01
1996-07-23 12:26:09	2019-12-30 13:11:33	1998-06-11 12:49:10	2020-07-09 13:11:10	1995-05-18 12:18:48	2016-08-31 13:11:31
1997-04-05 12:38:18	2020-01-15 13:11:30	1999-01-21 12:50:21	2020-08-26 13:11:26	1996-04-02 12:19:51	2016-12-05 12:11:39
1997-06-24 12:41:05	2020-03-19 13:11:09	1999-08-01 12:49:02	2021-02-18 13:11:23	1996-04-18 12:20:50	2017-05-14 13:10:45
1997-08-11 12:42:42	2020-04-04 13:11:00	2000-06-16 12:47:43	2021-05-25 13:11:01	1996-07-23 12:26:09	2018-09-06 13:10:55
1998-06-11 12:49:10	2020-06-07 13:10:54	2001-02-11 12:51:21	2021-07-28 13:11:21	1996-11-28 11:32:45	2018-12-11 12:11:12
1999-01-21 12:50:21	2020-07-09 13:11:10	2002-07-24 12:46:40		1997-04-05 12:38:18	2019-01-28 12:11:07
1999-02-06 12:50:29	2021-02-18 13:11:23	2003-07-11 12:47:41		1997-06-24 12:41:05	2019-04-02 13:10:52
1999-08-01 12:49:02	2021-05-25 13:11:01	2004-02-04 12:50:12		1997-08-11 12:42:42	2019-04-18 13:10:46
2000-05-31 12:47:22	2021-07-28 13:11:21	2004-03-07 12:50:22		1998-01-18 11:46:53	2019-06-05 13:11:05
2000-10-06 12:49:49		2004-08-30 12:54:45		1998-03-07 12:47:48	2019-07-07 13:11:15
2003-07-11 12:47:41		2004-09-15 12:55:10		1998-06-11 12:49:10	2019-12-30 13:11:33
2003-12-02 12:49:50		2004-12-04 12:56:49		1999-01-21 11:50:21	2020-01-15 13:11:30
2004-01-03 12:50:05		2004-12-20 12:57:06		1999-08-01 12:49:02	2020-04-04 13:11:00
2004-03-07 12:50:22		2005-05-29 12:58:45		1999-09-02 12:48:29	2020-06-07 13:10:54
2004-05-10 12:51:44		2005-09-02 12:59:27		2000-05-31 12:47:22	2020-07-09 13:11:10
2004-08-30 12:54:45		2005-11-05 12:59:28		2000-07-02 12:48:05	2020-09-11 13:11:33
2004-09-15 12:55:10		2005-11-21 12:59:52		2000-07-18 12:48:23	2021-02-18 13:11:23
2004-12-04 12:56:49		2006-04-30 13:03:15		2000-10-22 11:50:00	2021-05-25 13:11:01
2004-12-20 12:57:06		2006-08-20 13:04:49		2002-07-24 12:46:40	2022-02-13 13:11:33
2005-05-29 12:58:45		2006-09-05 13:05:01		2003-07-11 12:47:41	2022-05-12 13:11:14
2005-09-02 12:59:27		2006-09-21 13:05:13		2003-12-02 11:49:50	2022-05-20 13:10:50
2005-11-05 12:59:28		2007-01-27 13:06:17		2004-02-04 11:50:12	2022-06-13 13:11:29
2005-11-21 12:59:52		2007-07-06 13:05:03		2004-04-08 12:50:48	2022-07-07 13:11:11
2006-04-30 13:03:15		2007-08-23 13:04:37		2004-05-10 12:51:44	2022-09-01 13:11:51
2006-06-01 13:03:42		2008-03-02 13:01:36		2004-08-30 12:54:45	2022-12-30 13:11:46
2006-08-20 13:04:49		2009-02-01 12:56:51		2004-09-15 12:55:10	2023-01-23 13:11:41
2006-09-05 13:05:01		2009-03-05 12:57:39		2004-12-04 11:56:49	2023-02-08 13:11:41
2006-09-21 13:05:13		2009-08-12 13:00:36		2004-12-20 11:57:06	2023-03-04 13:11:33
2007-01-27 13:06:17		2009-10-31 13:01:35		2005-04-11 12:58:26	2023-03-20 13:11:27
2007-03-16 13:06:16		2010-02-04 13:02:12		2005-09-02 12:59:27	2023-04-13 13:10:53
2007-07-06 13:05:03		2010-08-15 13:01:39		2005-11-05 11:59:28	2023-05-07 13:10:59
2007-08-23 13:04:37		2010-11-19 13:01:08		2005-11-21 11:59:52	2023-05-15 13:10:36
2008-03-02 13:01:36		2011-05-30 13:00:49		2006-04-30 13:03:15	2023-06-08 13:10:45
2009-02-01 12:56:51		2011-08-02 13:00:16		2006-09-05 13:05:01	2023-06-16 13:10:48

Enseada-Itaguaçu		Forte-Capri		Pontal-Itapoá	
2009-08-12 13:00:36		2011-09-19 12:59:46		2006-09-21 13:05:13	2023-07-02 13:10:57
2010-02-04 13:02:12		2013-04-17 13:13:08		2007-01-27 12:06:17	2023-08-03 13:11:11

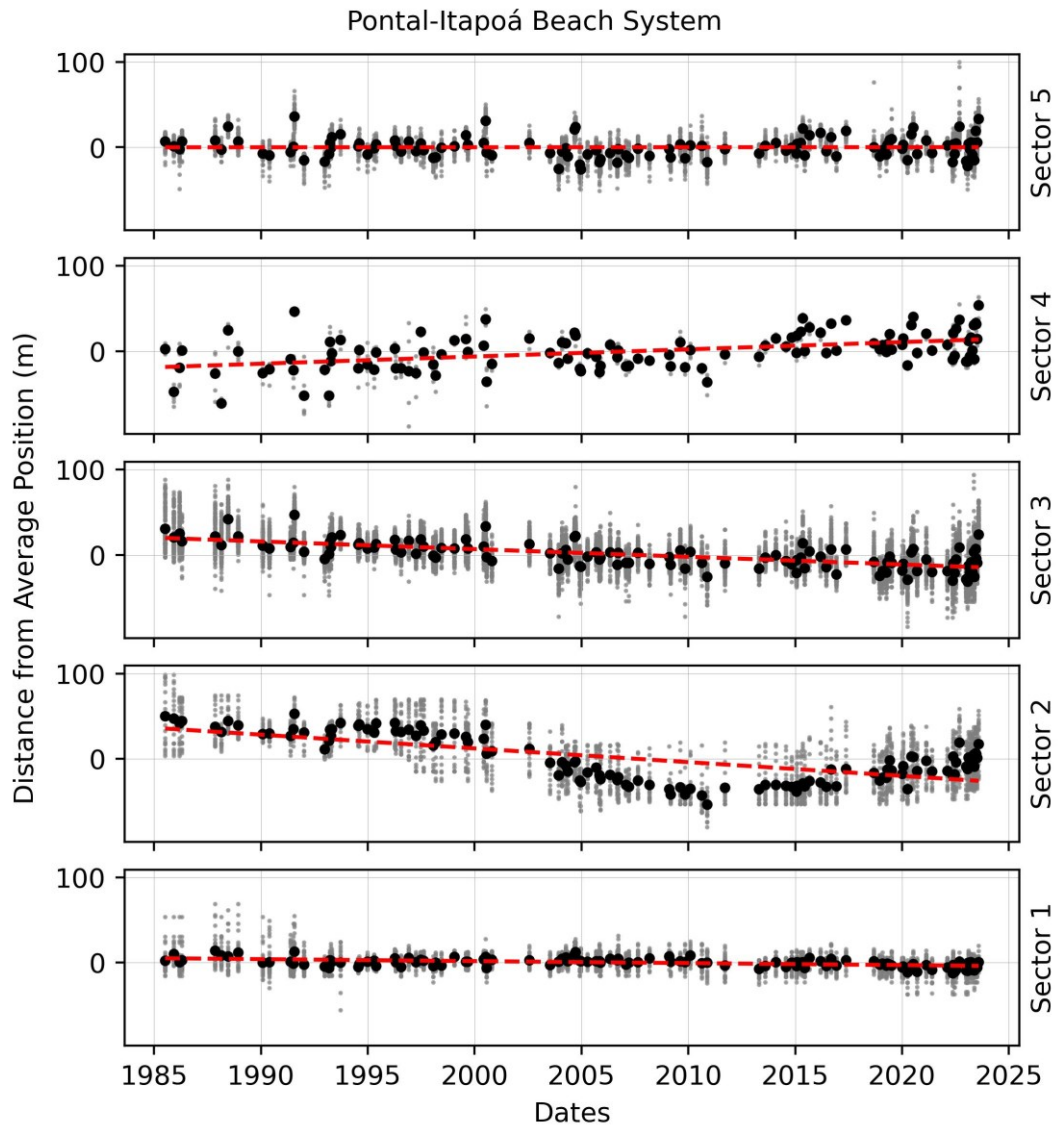
Material complementar 2. Comportamento dos setores do sistema praial Enseada-Itaguaçu. Os pontos em cinza representam a posição da linha de costa para um transecto do setor. Os pontos pretos representam a posição média da linha de costa dos transectos que compõem o setor. A linha tracejada vermelha representa a Regressão Linear da posição média da linha de costa. (*Supplementary material 2. Sectors behavior of Enseada-Itaguaçu beach system. The gray dots represent the shoreline position for an individual transect of the sector. The black dots represent the average shoreline position of the transects that's compose the sector. The red dashed line represents the Linear Regression.*)



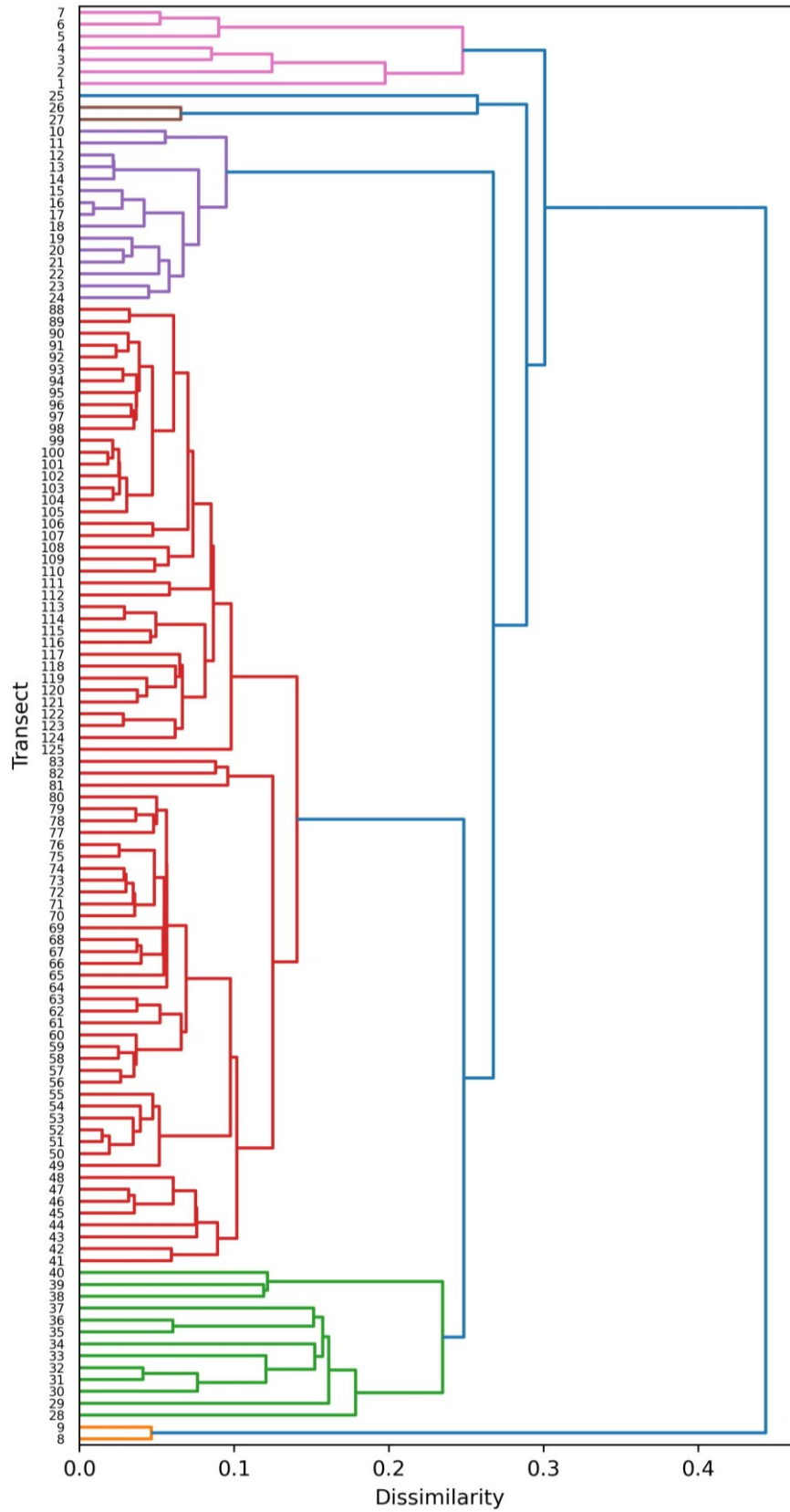
Material complementar 3. Comportamento dos setores do sistema praial Forte-Capri. Os pontos em cinza representam a posição da linha de costa para um transecto do setor. Os pontos pretos representam a posição média da linha de costa dos transectos que compõem o setor. A linha tracejada vermelha representa a Regressão Linear da posição média da linha de costa. (*Supplementary material 3. Sectors behavior of Forte-Capri beach system. The gray dots represent the shoreline position for an individual transect of the sector. The black dots represent the average shoreline position of the transects that's compose the sector. The red dashed line represents the Linear Regression.*)



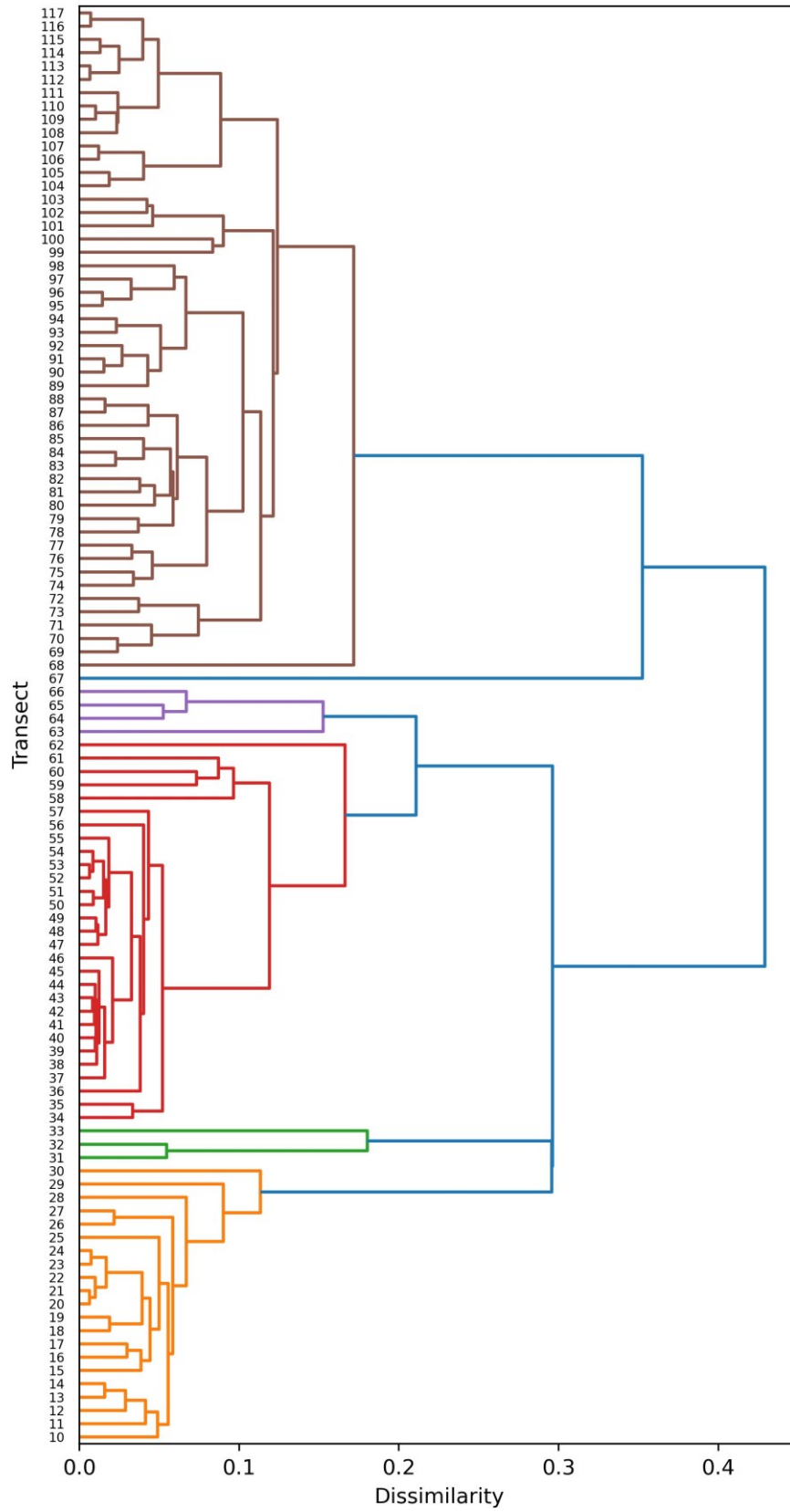
Material complementar 4. Comportamento dos setores do sistema praial Pontal-Itapoá. Os pontos em cinza representam a posição da linha de costa para um transecto do setor. Os pontos pretos representam a posição média da linha de costa dos transectos que compõem o setor. A linha tracejada vermelha representa a Regressão Linear da posição média da linha de costa. (*Supplementary material 4. Sectors behavior of Pontal-Itapoá beach system. The gray dots represent the shoreline position for an individual transect of the sector. The black dots represent the average shoreline position of the transects that's compose the sector. The red dashed line represents the Linear Regression.*)



Material complementar 5: Dendrograma da clusterização hierárquica do sistema praial Enseada-Itaguaçu.
(*Supplementary material 5. Hierarchical cluster dendrogram of Enseada-Itaguaçu beach system.*)



Material complementar 6: Dendrograma da clusterização hierárquica do sistema praial Forte-Capri.
(*Supplementary material 6. Hierarchical cluster dendrogram for Forte-Capri beach system*)



Material complementar 8. Desembocadura do rio Palmeiras na praia de Itapoá com formação de esporão arenosa, indicando que o transporte longitudinal de sedimentos é para norte. Fonte: Google Earth Pro, imagem de 27/10/2016. (Supplementary material 8. Palmeiras river inlet at Itapoá beach with sand spit formation, indicating the longitudinal sediment transport northward. Source: Google Earth Pro, image from 10/27/2016.)

