

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**RELAÇÕES ENTRE A PERMEABILIDADE E A EROSÃO
COSTEIRA NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL**

ELAINE BARONI DE OLIVEIRA

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

Porto Alegre, 2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

RELAÇÕES ENTRE A PERMEABILIDADE E A EROSÃO COSTEIRA NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

ELAINE BARONI DE OLIVEIRA

ORIENTADOR – Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Biancini da Silva – Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina

**Prof. Dr. Felipe Caron – Departamento Interdisciplinar, Campus do Litoral,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Prof. Dr. Sérgio Rebello Dillenburg – Programa de Pós-Graduação em Geociências,
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**Tese de Doutorado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do
Título de Doutor em Ciências.**

Porto Alegre, 2024

VERSO DA FOLHA DE ROSTO:

CIP - Catalogação na Publicação

Oliveira, Elaine
RELAÇÕES ENTRE A PERMEABILIDADE E A EROÇÃO COSTEIRA
NO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL / Elaine
Oliveira. -- 2024.
149 f.
Orientador: Eduardo Guimarães Barboza.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2024.

1. Permeabilidade praial. 2. Geotecnologias. 3.
Praia. 4. Planície Costeira. 5. Linha de Costa. I.
Guimarães Barboza, Eduardo, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Esses foram anos estranhos e difíceis, além do esperado para um doutorado. Ocorreram eventos que ninguém poderia esperar, mas que abalaram o mundo. Eventos que me fizeram questionar escolhas, que me levaram para longe, que me tiraram (e deram) muitas coisas. Por isso, agradeço a todos aqueles que cruzaram meu caminho nessa jornada, que me ofertaram a mão, ou que me abriram os olhos. Que me ajudaram a passar pelos anos mais difíceis, mas também mais memoráveis, da minha vida. Os agradecimentos a seguir se referem às pessoas e às instituições que colaboraram na concretização deste trabalho.

Agradeço inicialmente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa e taxa de bancada concedidas durante os primeiros dezoito meses do desenvolvimento do doutorado. Agradeço também à UFRGS, ao Instituto de Geociências (IGEO), ao Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) e ao Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) por toda a infraestrutura e pessoal.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Eduardo Barboza, pela excelente orientação. A autonomia e o apoio ofertados foram imprescindíveis para o desenvolvimento da Tese. A liberdade e o incentivo na escolha dos caminhos, tanto científicos quanto pessoais, me ajudaram a chegar aos resultados obtidos.

Agradeço aos professore(a)s Felipe Caron, Maria Luiza Rosa, Sérgio Dillenburg e Elírio Toldo Jr. que, ao longo do trajeto, me ofertaram ajuda, equipamentos, dados e ensinamentos, que foram essenciais para a conclusão dessa Tese.

Agradeço aos colegas e aos amigos que me acompanharam ao longo desses anos, e que tornaram essa jornada mais fácil e menos solitária.

Agradeço à minha família, meus pais Heloisa e Elias e as minhas irmãs Gláucia e Grazielle, que apoiaram minhas decisões, mesmo quando essas escolhas me levaram para longe. Sou grata pela confiança, pelo carinho, e pela formação que me deram. O que sou e tenho hoje foi graças aos seus esforços e sacrifícios. Espero que sintam tanto orgulho de mim, quanto eu tenho de vocês.

Agradeço ao meu companheiro, Filipe Condé, que sempre esteve ao meu lado. Agradeço por ser meu motorista, meu companheiro de campo, meu revisor de artigos, meu suporte técnico, entre tantas outras atribuições. Obrigada por ter acreditado em mim (mesmo quando eu duvidava) e por ter me dado suporte nas minhas escolhas. Obrigada pelo esforço em estar e se fazer presente sempre. Esses anos foram mais leves com você do meu lado.

RESUMO

A presença de depósitos de turfa em subsuperfície em algumas regiões da costa do Rio Grande do Sul (RS) é, intrinsicamente, associada à uma redução na permeabilidade dos depósitos sedimentares praias. Nesse contexto, o objetivo principal desta Tese é expandir o conhecimento acerca da permeabilidade nos depósitos praias, compreendendo, portanto, as relações entre a permeabilidade, a evolução geológica e o comportamento da linha de costa/padrão de empilhamento estratigráfico. Para atingir esse objetivo, diferentes metodologias foram aplicadas. Primeiramente, dados bibliográficos foram analisados com o auxílio das ferramentas *VOSviewer*, *Altmetrics Bookmarklet* e *Tree of Science* a fim de realizar uma revisão sistemática dos estudos de permeabilidade em praias. Para caracterizar o padrão de empilhamento estratigráfico e o deslocamento da linha de costa foram utilizadas as ferramentas GPR (*Ground Penetrating Radar*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), CoastSat e Cassie. A parametrização da permeabilidade foi definida com o auxílio do permeâmetro de tubo aberto, sendo que as análises descritivas e de correlação foram realizadas com o auxílio do software Jamovi. Como resultados se obteve uma revisão bibliográfica enquadrando a permeabilidade nos estudos costeiros, a caracterização do comportamento da linha de costa/padrão de empilhamento estratigráfico nas áreas de estudo, e uma caracterização estatística e espacial da permeabilidade. A revisão bibliográfica mostrou a evolução e o enquadramento da permeabilidade nos estudos costeiros, possibilitando a identificação de tendências e de lacunas, sendo uma das principais lacunas a falta de medições *in situ*. A caracterização da linha de costa mostrou que a Praia das Cabras, entre os municípios de Tramandaí e de Cidreira, é caracterizada como uma linha de costa transgressiva, com padrão de empilhamento estratigráfico retrogradacional, que sofre erosão em escala histórica, enquanto na praia de Arroio do Sal, apresenta uma linha de costa regressiva, com empilhamento estratigráfico progradacional, e estável na escala interdecadal. Os resultados das análises estatísticas permitiram constatar que a presença e a profundidade de uma camada de turfa não influenciam o coeficiente de permeabilidade, e que não há correlação entre a permeabilidade e o deslocamento atual da linha de costa. No entanto, a distribuição espacial do coeficiente de permeabilidade em uma mesma praia mostra que trechos distintos da praia apresentaram valores significativamente menores; nos locais onde ocorre o tráfego de veículos, os valores de permeabilidade são significativamente menores. Enfim, podemos concluir que a permeabilidade não é o fator que conecta a erosão em diferentes escalas temporais, já que as análises estatísticas realizadas mostraram não haver correlação entre a presença de turfa e o coeficiente de permeabilidade.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica, Geotecnologias, Praia, Correlação, Planície Costeira, Linha de Costa, Barreiras Costeiras.

ABSTRACT

The presence of subsurface peat deposits in some areas of the Rio Grande do Sul (RS) coast is intrinsically associated with a reduction in the permeability of beach sediment deposits. In this context, the primary objective of this thesis is to expand the understanding of permeability in beach deposits, thereby comprehending the relationships between permeability, geological evolution, and the behavior of the coastline/stratigraphic stacking pattern. Different methodologies were applied to achieve this objective. Firstly, bibliographic data were analyzed using VOSviewer, Altmetrics Bookmarklet, and Tree of Science tools to systematically review permeability studies on beaches. GPR (Ground Penetrating Radar), UAV (Unmanned Aerial Vehicle), CoastSat, and Cassie tools were used to characterize the stratigraphic stacking pattern and coastline displacement. The permeability parameterization was defined using the open tube permeameter, and descriptive and correlation analyses were performed with the help of Jamovi software. The results included a bibliographic review of situating permeability within coastal studies, the characterization of coastline behavior/stratigraphic stacking patterns in the study areas, and a statistical and spatial characterization of permeability. The bibliographic review demonstrated the evolution and context of permeability in coastal studies, identifying trends and gaps, with one of the main gaps being the lack of in situ measurements. The coastline characterization showed that Praia das Cabras, between the municipalities of Tramandaí and Cidreira, be characterized as a transgressive coastline with a retrogradational stratigraphic stacking pattern, experiencing historical scale erosion, while in Arroio do Sal, the coastline is regressive with a progradational stratigraphic stacking pattern and stable on an interdecadal scale. The statistical analyses revealed that the presence and depth of a peat layer do not influence the permeability coefficient, and there is no correlation between permeability and the current coastline displacement. However, the spatial distribution of the permeability coefficient within the same beach showed that different sections exhibited significantly lower values. In areas with vehicle traffic, permeability values are considerably lower. In conclusion, permeability is not the factor that connects erosion across different temporal scales, as statistical analyses showed no correlation between the presence of peat and the permeability coefficient.

Keywords: Hydraulic conductivity, Geotechnologies, Beach, Correlation, Coastal Plain, Coastline, Coastal barriers

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1: Modelo conceitual da relação entre infiltração e o transporte de sedimentos na zona de swash. Adaptado de Baird and Horn (1996) 12
- Figura 1.2: Nomenclatura do perfil praiado adotada neste estudo. Adaptado de Komar (1983).
..... 15
- Figura 1.3: Definição dos níveis de água superficial e subsuperficial na zona de swash. Adaptado de Horn (2002)..... 17
- Figura 1.4: Ensaio de 'tubo aberto'. (A) Ensaio de permeabilidade ao óleo. Fonte: Lopes (2016). (B) Tubo mostrando os níveis de variação. Fonte: Pereira (2005) 19
- Figura 1.5: Estágios que caracterizam o modelo evolutivo da barreira holocênica no Hermenegildo (esquemático e não em escala). (A) posicionamento de uma barreira transgressiva (5,6 ka); (B, C e D) recessão da barreira e transgressão dos campos de dunas entre 6,7 ka e o presente devido a um balanço negativo de sedimentos. Adaptado de Lima et al. (2013). 22

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1: Fluxograma do processo metodológico. Elaborado pelos autores com uso do Canvas 29
- Figura 2.2: Clusters indicando a colaboração entre autores. O alto número de clusters indica uma ramificação dos tópicos de estudos e uma falta de colaboração entre autores de um mesmo tópico. A cor cinza representa clusters menores e com um menor número de conexões. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer. 33
- Figura 2.3: Rede de colaboração entre autores. Os nós representam os autores, e as linhas representam as conexões entre eles. O tamanho dos nós está associado ao número de publicações de cada autor, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre autores. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer. 34
- Figura 2.4: Rede de colaboração entre países. Os nós representam os países, e as linhas representam as conexões entre eles. O tamanho dos nós está associado ao número de publicações, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre países. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer. 35
- Figura 2.5: Co-ocorrência de palavras-chave. A cor do cluster representa o grupo de palavras-chave associadas, enquanto o tamanho dos nós representa a frequência de ocorrência. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer. 36
- Figura 2.6: Mapa de distribuição dos leitores na plataforma Mendeley. O tamanho dos pontos representa o número de leitores. Elaborado pelos autores com o uso de ArcGis®. 38
- Figura 2.7: Linha do tempo para o campo de estudo "estudos de permeabilidade e condutividade em praias" 43
- Figura 2.8: Mapa de interações do campo de pesquisa. Elaborado pelos autores 44

CAPÍTULO 3

- Figure 3.1: Location of the Study Area: Praia das Cabras, Rio Grande do Sul, Brazil. The red line represents the subsurface profile acquired with the GPR, whereas the red points represent the UAV targets used during the UAV acquisition. Imagery source credits: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community. Maps source: IBGE. 60
- Figure 3.2: Orthophotos generated with the UAV data. The three maps show a distinction in the dune stages between the northern and southern parts: whereas the foredune ridge is uninterrupted in the north, it is broken up in the south..... 64
- Figure 3.3: A closer look at the dunes from 2019 and 2023. The photos reveal that the blowouts are shallower in 2023 and that the incipient dunes that formed a wide, vegetated ramp in 2019 are narrower and nearly bare in 2023. 65
- Figure 3.4: Digital Elevation Model for 2015, 2019, and 2023 surveys. The maps illustrate the greater altitude values at the dunes' crests and along the linear sand trails. The reduction in altitude induced by a washout in the southern region is visible in 2023. 66
- Figure 3.5: DEM of Difference (DoD) showing volumetric change between the periods. On the left is a comparison between 2019 and 2015. On the right is the period between 2023 and 2019. 67
- Figure 3.6: Results of automatic classification for vegetation cover on the dunes. Between 2015 and 2019, the vegetated area got higher, whereas from 2019 and 2023 it declined by 1.5% 68
- Figure 3.7: GPR profile section. On the top is shown the direction and pattern of reflections. At the bottom, are the units and radarfacies. 70
- Figure 3.8: Shoreline change rates (from 2015 to 2023), in meters per year, using the Linear Regression Rate and the dune toe proxy. The color scheme represents the degree of erosion, with hot tones indicating severe erosion..... 71
- Figure 3.9: Picture of Praia das Cabras showing the outcrop of lagoonal mud at the beach. Credit: Eduardo Barboza..... 72

CAPÍTULO 4

- Figure 4.1: Location of the Study Area at Arroio do Sal, Rio Grande do Sul, Brazil. Imagery source: Esri. Maps source: IBGE. 87
- Figure 4.2: Flowchart of the overall methodology for assessing the shoreline changes and the accuracy of the algorithms. 89
- Figure 4.3: Comparison of shoreline positions extracted from Landsat (left) and Sentinel (right) from both algorithms. Imagery source: Esri 92
- Figure 4.4: Evaluation of the accuracy of the shoreline algorithms. Graph showing the horizontal error distributions for each method. Positive (negative) errors indicate a displacement towards the land (towards the sea). The points represent the area with a higher difference for each algorithm. Imagery source: Esri. 93

- Figure 4.5: Classification of shoreline change rates for each analysis performed. Colors represent the classes. S stands for Sentinel and L for Landsat..... 95
- Figure 4.6: Shoreline change rates, in meters per year. The color scheme represents the trend of displacement, with hot tones indicating erosion and green tones representing accretion. Imagery source: Esri..... 96
- Figure 4.7: Shoreline change rates, in meters per year, using manually digitalized shorelines. On the left the results use the instantaneous waterline as a proxy, in the right the dune toe. The color scheme represents the trend of displacement, with hot tones indicating erosion and green tones representing accretion. Imagery source: Esri..... 97

CAPÍTULO 5

- Figure 5.1: Location of the study area showing sampling sites, Digital Elevation Model (SRTM), general bathymetry (Brazilian Geological Survey – CPRM). Maps source: IBGE and SGB. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.2: Interpreted section of the GPR profile showing the radarfacies. (A) Praia das Cabras. Adapted from Oliveira and Barboza (2023). (B) Jardim do Éden. Adapted from Watanabe et al. (2023). I- Depósitos pleistocênicos; II- Depósitos lagunares; III- Depósitos eólicos. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.3: Interpreted section of GPR profile at Arroio do Sal showing the radarfacies. The arrows represent the reflection terminations (toplap: orange, downlap: green). Source: Barboza et al. (2021a). **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.4: Shoreline change rates in meters per year. The color scheme represents the displacement trend, with hot tones indicating erosion. Map source: IBGE. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.5: On the left, the histogram of the collected permeability values. On the right, the boxplot with the outliers. Graphs produced with Jamovi software **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.6: Boxplot with the outliers for the LRR rates in each study area. Graphs produced with Jamovi software. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.7: Results of the permeability interpolation with Natural Neighbor for the three study sites. The color scheme represents the scale, with hot tones indicating lower permeability values. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.8: Boxplot with the outliers for the permeability coefficient for each sampled position. Graphs produced with Jamovi software. **Erro! Indicador não definido.**
- Figure 5.9: On the left, the histogram of permeability values using the data from the literature. On the right is the boxplot with the outliers. Graphs produced with Jamovi software..... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE QUADROS E TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1: Ordens de grandeza de valores de k (cm/s). Adaptado de Ortigão (2007)	18
Tabela 1.2: Equações recomendadas para estimar a condutividade hidráulica para depósitos praias. Fonte: Rosas et al. (2014)	20

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1: As sete publicações mais citadas para os estudos de permeabilidade em praias. NC refere-se ao número de citações.	30
Tabela 2.2: As sete publicações mais citadas para os estudos de permeabilidade em praias. NP = número de publicações; NC = número de citações	30
Tabela 2.3: A lista dos 10 países mais produtivos na pesquisa sobre os estudos de permeabilidade em praias com base no número de publicações. NP e NC representam o número de publicações e citações. A participação se refere ao total geral de artigos (N=51).	31
Tabela 2.4: A lista dos 10 periódicos mais produtivos na pesquisa sobre permeabilidade de praias com base no número de publicações. NP e NC representam o número de publicações e citações	32
Tabela 2.5: As 10 principais palavras-chave com base em sua ocorrência. N representa o número de ocorrências. Links se refere ao número de conexões. A força total do link (FTL) refere-se à soma das forças dos links conectados a determinadas palavras-chave.....	36
Tabela 2.6: Atenção social das publicações sobre permeabilidade e praia, incluindo o compartilhamento e menções on-line em diferentes mídias sociais e o número de leitores na plataforma Mendeley.	37
Tabela 2.7: Árvore do conhecimento sobre o papel da permeabilidade na morfologia de praias, mostrando a divisão entre os documentos que compõem a raiz, tronco e folhas da árvore.	39
Tabela 2.8: Agrupamento do campo de pesquisa em subcategorias. A forma de inclusão da permeabilidade em cada grupo também é mostrada.	42
Quadro 2.1: Clusters dos autores colaborativos mais ativos. O cluster é formado pelo agrupamento de autores que são coautores em diversas pesquisas e publicaram artigos sobre tópicos semelhantes.	33
Quadro 2.2: Clusters das principais palavras-chave sobre o papel da permeabilidade na morfologia praias. O cluster é formado pelo agrupamento de palavras com tópicos semelhantes	37

CAPÍTULO 3

Table 3.1: Accuracy assessment for the automatic classification	68
Table 3.2: Description of radarfacies.....	70

Table 3.3: Synoptic patterns capable of generating extreme events on the RS coast. Source: Machado et al. (2011).	74
---	----

CAPÍTULO 4

Table 4.1: Description of the satellite-derived-shoreline algorithms used at this study.	88
Table 4.2: Summary of the different datasets of satellite imagery available on GEE	89
Table 4.3: Classification of the rates of shoreline change according to Esteves and Finkl Jnr. (1998).	91
Table 4.4: Linear Regression Rate for each analysis. IWL = Instantaneous Waterline; DT = Dune toe	94
Table 4.5: Estimated shoreline position uncertainties to the manual shoreline dates used. R = Scanning error (pixel size); G = georeferencing error (RMSE); D = Physical component specific to shoreline proxy uncertainty; Ep = total uncertainty	98

CAPÍTULO 5

Table 5.1: Dataset with the data used. Kb refers to the permeability coefficient at the berm; Mz is the mean grain size, σ is the standard deviation, and β is the beach slope. The barrier categorization source is displayed in the last column. * refers to data collected in this study.	Erro! Indicador não definido.
Table 5.2: Descriptive analysis of the collected permeability coefficient for the study areas	Erro! Indicador não definido.
Table 5.3: Spearman coefficient correlation. The results show that there is no correlation between the presence of a peat layer and the permeability coefficient for the study areas.	Erro! Indicador não definido.
Table 5.4: Descriptive analysis of the study areas' linear regression rates (LRR).....	Erro! Indicador não definido.
Table 5.5: Spearman coefficient correlation. The results show that there is no correlation between the LRR and the permeability coefficient for the study areas	Erro! Indicador não definido.
Table 5.6: Descriptive analysis of the permeability coefficient according to the position of the collected sample.	Erro! Indicador não definido.
Table 5.7: Kruskal-Wallis test. The results show that there is a significant difference in the permeability coefficient between the positions of the sampling points, where the berm has higher values than the others.....	Erro! Indicador não definido.
Table 5.8: Spearman coefficient correlation. The results shows that there is a correlation between the permeability coefficient and the sampled point position	Erro! Indicador não definido.
Table 5.9: Descriptive analysis of the permeability coefficient according to the barrier type. Data extracted from the literature.....	Erro! Indicador não definido.
Table 5.10: Spearman coefficient correlation matrix. The results show that there is a correlation between the permeability coefficient and the mean grain size (Mz).	Erro! Indicador não definido.

Table 5.11: Linear regression model, where k is the dependent variable and Mz is the predictor
..... **Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.1. Introdução.....	11
1.2. Premissas e Hipótese.....	13
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivos específicos:.....	13
1.4. Materiais e Métodos.....	13
1.5. Base conceitual.....	14
1.5.1. Terminologia adotada.....	14
1.5.2. Definição de termos:.....	15
1.5.3. Coeficiente de Permeabilidade.....	17
1.5.4. Turfeiras.....	20
1.6. Estado da arte no Brasil:.....	22
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DOS ESTUDOS DE PERMEABILIDADE EM PRAIAS USANDO TÉCNICAS COMPUTACIONAIS.....	25
2.1. Introdução.....	25
2.2. Materiais e Métodos.....	27
2.3. Resultados.....	29
2.3.1. Desempenho.....	29
2.3.2. Conexões.....	32
2.3.3. Palavras-chave.....	35
2.3.4. Atenção social: Altmetric Bookmarklet.....	37
2.3.5. Tree of Science (ToS).....	38
2.3.6. Agrupamento e Evolução.....	40
2.4. Discussão.....	44
2.5. Conclusões.....	48
Referências.....	49
3. A MULTI-SCALE ASSESSMENT OF SHORELINE CHANGES AT AN UNDEVELOPED BEACH IN SOUTHERN BRAZIL.....	57
3.1. Introduction.....	57
3.2. Physical settings.....	59
3.3. Material & Methods.....	61
3.3.1. Geological Scale:.....	61
3.3.2. Interannual Scale:.....	62
3.4. Results & Discussion.....	64
3.4.1. Surface data products:.....	64
3.4.2. Vegetation cover:.....	67
3.4.3. Geological Scale:.....	69

3.4.4. Interannual Scale:.....	70
3.5. Conclusions.....	74
References.....	76
4. SHORELINE CHANGE ASSESSMENT AT ARROIO DO SAL (BRAZIL) USING DIFFERENT SHORELINE EXTRACTION METHODS.....	83
4.1. Introduction.....	84
4.2. Material and Methods	86
4.2.1. Study area:	86
4.2.2. Algorithms:	87
4.2.3. Methods:.....	88
4.3. Results	91
4.3.1. Automatic shoreline extraction:.....	91
4.3.2. Accuracy:.....	93
4.3.3. Changes in shoreline	94
4.3.4. Uncertainty assessment.....	97
4.4. Discussion	98
4.5. Conclusions.....	102
References.....	103
5. UNVEILING COASTAL DYNAMICS: A STATISTICAL EXAMINATION OF PERMEABILITY, STRATIGRAPHIC PATTERNS, AND COASTLINE DISPLACEMENT CORRELATIONS	Erro! Indicador não definido.
5.1. Introduction.....	Erro! Indicador não definido.
5.2. Physical settings.....	Erro! Indicador não definido.
5.3. Material and Methods	Erro! Indicador não definido.
5.3.1. Literature description	Erro! Indicador não definido.
5.3.2. Data collection	Erro! Indicador não definido.
5.3.3. Data Source.....	Erro! Indicador não definido.
5.3.4. Data analysis	Erro! Indicador não definido.
5.4. Results	Erro! Indicador não definido.
5.4.1. Permeability.....	Erro! Indicador não definido.
5.4.2. Data Source Permeability	Erro! Indicador não definido.
5.5. Discussion	Erro! Indicador não definido.
5.6. Conclusions.....	Erro! Indicador não definido.
References.....	Erro! Indicador não definido.
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
7. Referencias	112
8. ANEXOS.....	117

ESTRUTURA DA TESE

Esta Tese de doutorado está estruturada em quatro artigos, sendo três publicados e um submetido em periódicos classificados nos estratos Qualis-PPGEO (N6, N3, A2 e N3). A sua organização compreende as seguintes partes principais:

Capítulo 1: Contempla aspectos introdutórios, os objetivos, as premissas e a hipótese, o referencial teórico, o estado da arte e as principais ferramentas que foram utilizadas nesta Tese.

Capítulo 2: Contém o artigo científico “*Revisão sistemática dos estudos de permeabilidade em praias usando técnicas computacionais*” publicado no periódico “**Pesquisas em Geociências**”.

Capítulo 3: Apresenta o artigo científico “*A multi-scale assessment of shoreline changes at an undeveloped beach in Southern Brazil*” publicado no periódico “**Jornal South American Earth Sciences**”

Capítulo 4: Contém o artigo científico “*Shoreline change assessment at Arroio do Sal (Southern Brazil) using different shoreline extraction methods*” publicado no periódico “**Remote Sensing Applications: Society and Environment**”.

Capítulo 5: Inclui o artigo científico “*Unveiling Coastal Dynamics: A Statistical Examination of Permeability, Stratigraphic Patterns, and Coastline Displacement Correlations*” submetido para publicação no periódico “**Regional Studies in Marine Science**”.

Capítulo 6: Contém um resumo dos principais resultados obtidos, a discussão integradora dos resultados, conclusões, e referências bibliográficas.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

Um dos fatores cruciais para a previsão das alterações na morfologia das praias é a movimentação transversal de sedimentos, sendo que o fluxo vertical das águas para dentro e fora da praia desempenha um papel determinante na mobilidade sedimentar na zona de espraiamento (Bagnold, 1940; Turner & Masselink, 1998; Nielsen et al., 2001; Butt et al., 2001; Horn & Li., 2006). Grant (1948) foi um dos primeiros autores a sugerir uma relação entre a infiltração e a movimentação de sedimentos na costa. A infiltração, definida como o processo de infiltração de água na face da praia, cria assimetrias na dinâmica do fluxo, influenciando o transporte de sedimentos e nos padrões de deposição (Masselink & Li, 2001; Horn, 2002; Austin et al., 2006).

A infiltração reduz a velocidade da retrolavagem e prolonga a existência de um fluxo laminar nas praias permeáveis, favorecendo o transporte em direção ao continente e a deposição de sedimentos na face da praia (Grant, 1948; Masselink & Li, 2001; Horn, 2002; Li et al., 2002; Kulkarni et al., 2004). Praias impermeáveis, em contrapartida, apresentam velocidades de retrolavagem aceleradas devido à adição de água à superfície na zona de efluente, resultando em uma erosão mais rápida causada pela ação das ondas, como exibido na Figura 1.1 (Grant, 1948; Masselink & Li, 2001; Horn, 2002; Li et al., 2002; Kulkarni et al., 2004).

A relação entre a infiltração e a permeabilidade da praia é crucial, pois as praias permeáveis e impermeáveis respondem de forma diferente aos processos de infiltração. A diferenciação da permeabilidade praial pode ser feita pela saturação da camada de areia ou pela estratigrafia sedimentar. De acordo com Grant (1948), as praias permeáveis são secas, não saturadas e com lençol freático profundo, enquanto as praias impermeáveis são úmidas, saturadas e com lençol freático raso. Rosen (1980) explica que as praias permeáveis têm seções transversais consistentes dominadas por materiais arenosos, enquanto as praias impermeáveis têm distribuições heterogêneas, frequentemente, com camadas ricas em argila sob superfícies arenosas.

No contexto dessa definição, a presença de depósitos de turfa em subsuperfície em algumas regiões da costa do Rio Grande do Sul (RS) é associada à uma redução da permeabilidade praial (Klein & Calliari, 1997; Figueiredo & Calliari, 2005, 2006;

Pereira et al., 2006). Segundo os autores, a presença dessa camada impermeável, inibe a infiltração no espraiamento e causa a saturação do pacote sedimentar, favorecendo a erosão e o afloramento de água doce na praia na forma de sangradouros. Pereira et al. (2006) ainda sugere que a permeabilidade pode desempenhar um papel significativo nas taxas de erosão no Farol da Conceição (litoral médio do RS), uma região considerada um *hotspot* erosivo com taxas de erosão na faixa de 3 m/ano (Bose et al., 2020) e que possui um histórico de afloramentos de turfas subsuperficiais (Lima et al., 2020).

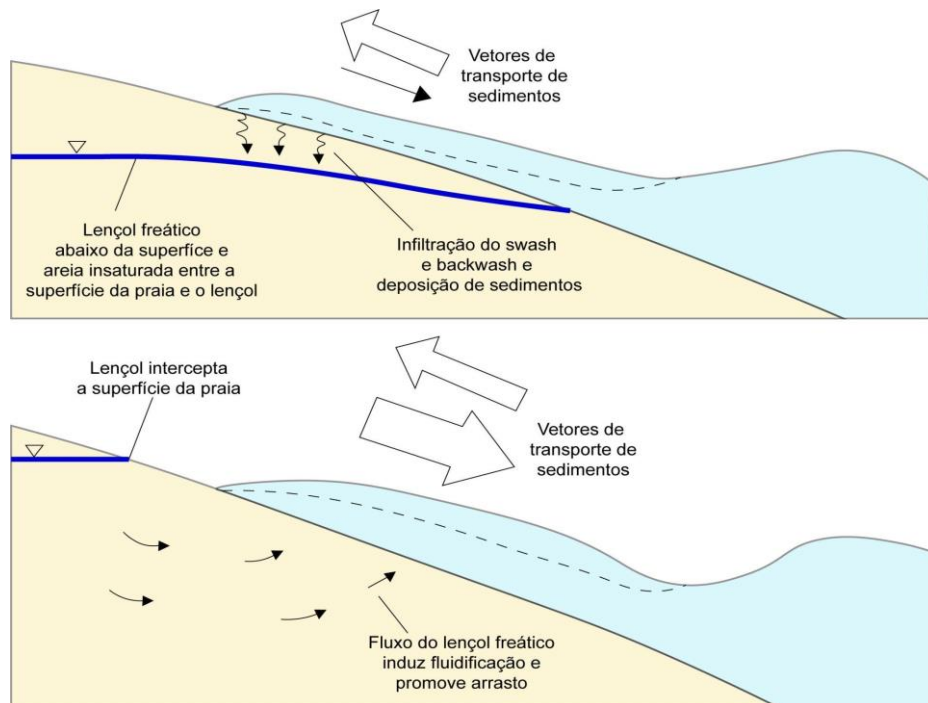


Figura 1.1: Modelo conceitual da relação entre infiltração e o transporte de sedimentos na zona de *swash*. Adaptado de Baird and Horn (1996)

Embora os depósitos paludiais sejam reconhecidos como um fator pertinente que influencia a morfologia e a dinâmica das praias, a correlação entre esses depósitos, a permeabilidade e o deslocamento da linha de costa no RS só foram abordados, até agora, de forma indutiva. Notadamente, há uma falta de investigações estatísticas para fundamentar e validar essa intrincada inter-relação.

O conhecimento da influência da permeabilidade na erosão ainda pode ser útil para o aperfeiçoamento das técnicas de proteção à erosão, como a Técnica de Drenagem (*Dewatering Technique*), engordamento praias ou espigões permeáveis (*permeable groin*), assim como para calibrar e validar os modelos de previsão da erosão, para a criação de planos de vulnerabilidade ambiental e para o aperfeiçoamento de modelos empíricos de previsão da permeabilidade.

1.2. Premissas e Hipótese

Partindo das premissas de que os processos de infiltração e de exfiltração têm papel nos ciclos erosivos e acrescionais na praia; e de que a presença de camadas impermeáveis em subsuperfície afeta a permeabilidade e a movimentação de sedimentos, a seguinte hipótese foi formulada e investigada.

A hipótese considera que a variabilidade da permeabilidade no sistema praial, formada a partir da evolução geológica da barreira holocênica do Rio Grande do Sul, é significativa para influenciar o deslocamento da linha de costa em curta escala de tempo e afetar o perfil da praia frente aos eventos de alta energia.

1.3. Objetivos

O objetivo principal desta Tese é expandir o conhecimento acerca da permeabilidade nos depósitos praiais, compreendendo as relações entre a permeabilidade, a evolução geológica e o comportamento da linha de costa.

1.3.1. *Objetivos específicos:*

- Realizar uma revisão sistemática dos estudos de permeabilidade em praias;
- Caracterizar o deslocamento da linha de costa/padrão de empilhamento estratigráfico em diferentes escalas de tempo nas áreas de estudo;
- Descrever a distribuição espacial da permeabilidade nas áreas de estudo;
- Avaliar a correlação entre a permeabilidade e o padrão estratigráfico através de análises estatísticas;
- Analisar se a presença de uma camada impermeável afeta significativamente a permeabilidade de uma praia;

1.4. Materiais e Métodos

Para testar a hipótese e alcançar os objetivos propostos desta Tese, diferentes abordagens foram necessárias. Dessa forma, quatro artigos (Capítulos 2, 3, 4 e 5) foram produzidos utilizando procedimentos metodológicos e tipo/fonte de dados distintos. A seguir, serão mencionadas brevemente as principais ferramentas utilizadas em cada artigo (a descrição detalhada encontra-se nos mesmos):

Para realizar a revisão sistemática dos estudos de permeabilidade em praias (**Capítulo 2**) foram utilizados dados bibliográficos extraídos da base de dados “Web

of Science”, que foram analisados com o auxílio das ferramentas *VOSviewer*, *Altmetrics Bookmarklet* e *Tree of Science*.

A caracterização do deslocamento da linha de costa na área de estudo foi dividida em dois artigos. O primeiro, tema do **Capítulo 3**, mostra o deslocamento da linha de costa/padrão de empilhamento estratigráfico da Praia das Cabras em diferentes escalas de tempo. A evolução costeira de longo prazo foi investigada através de dados de GPR (*Ground Penetrating Radar*), enquanto as mudanças na linha de costa em escala interanual foram analisadas pelo *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), utilizando dados de UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) coletados pelos autores. O segundo artigo (**Capítulo 4**) caracteriza o deslocamento da linha de costa em Arroio do Sal através da extração automática das posições da linha de costa pelo CoastSat e Cassie, seguida pela vetorização manual das linhas de costa utilizando dois proxies da linha de costa diferentes.

Para avaliar as relações entre a ocorrência de turfa, da permeabilidade e do deslocamento da linha de costa, foram realizadas análises estatísticas descritivas e de correlação. Os dados utilizados nos tratamentos estatísticos provêm das coletas realizadas durante a Tese e da literatura. Este é o tema do **Capítulo 5**.

1.5. Base conceitual

1.5.1. Terminologia adotada

As terminologias adotadas neste trabalho, exibidas na Figura 1.2, serão descritas a seguir.

Zona Costeira: também denominada de costa ou orla, é toda a área compreendida entre o limite em direção ao continente e em direção ao oceano. Tais limites são (deliberadamente) imprecisos e regionais (Davidson-Arnott et al., 2019).

Linha de costa: termo geral usado para indicar a localização onde a terra encontra o mar. Devido à natureza dinâmica desse limite, a definição é dependente da escala de trabalho do estudo (podendo assumir valores instantâneos de movimentação da onda, ou uma posição semipermanente) (Davidson-Arnott et al., 2019).

Retropraia (*back beach*): feição na retaguarda da praia, onde há dunas, estuários, etc. (Muehe, 2019).

Praia (*backshore*): Porção que se entende da face de praia (linha de costa) até a retrobarreira. A praia é seca sob condições normais, sendo exposta à ação de ondas sob condições de tempestade (Muehe, 2019; Davidson-Arnott et al., 2019).

Face de praia (*foreshore* ou *beach face*): Compreende a zona de espraiamento (*swash*) e está sujeita à ação das ondas durante condições normais. Se estende da linha de costa até o limite superior da antepraia (Muehe, 2019; Davidson-Arnott et al., 2019).

Zona de arrebatção e zona de surf (*breaker and surf zone*): zona de quebra das ondas devido à instabilidade. Marcada pela presença de bancos e cavas. A extensão da zona de *surf* varia com a declividade da praia e com as condições de onda (Davidson-Arnott et al., 2019).

Antepraia (*shoreface* ou *nearshore*): porção submersa do perfil, que inclui a zona de surfe, arrebatção e a extensão em direção à plataforma continental interna. É dividida em antepraia superior (*upper shoreface*), cujos limites vão do refluxo da onda na face de praia à profundidade de fechamento; e em antepraia inferior (*lower shoreface*), que se estende da profundidade de fechamento até o limite com a plataforma continental interna (Muehe, 2019).

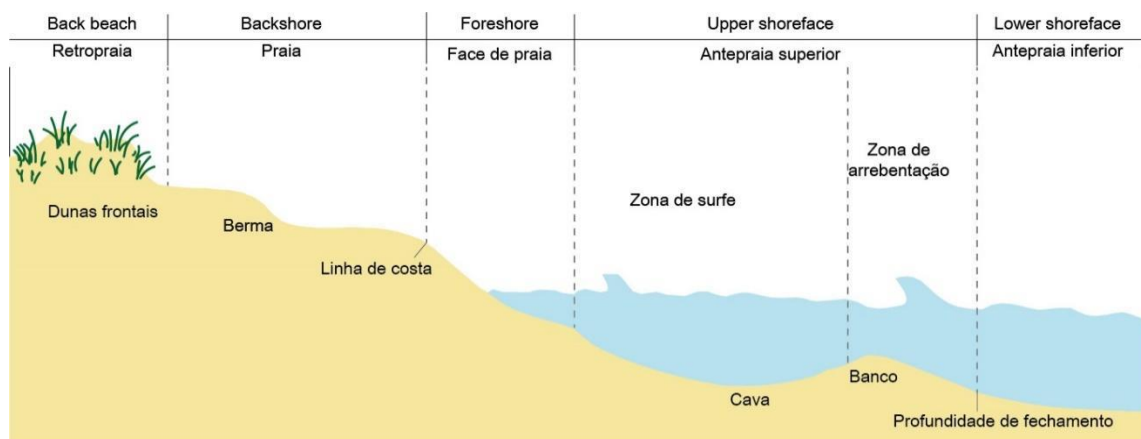


Figura 1.2: Nomenclatura do perfil praiado adotada neste estudo. Adaptado de Komar (1983).

1.5.2. Definição de termos:

Dentro dos estudos de fluxo, escoamento de água e das flutuações do lençol freático, diferentes termos são utilizados para descrever os processos e as etapas da movimentação de água no solo. A diferenciação entre os termos (Fig. 1.3) é essencial para compreender cada processo e suas inter-relações.

- a. **Infiltração:** processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, por meio de poros ou pequenas aberturas, em uma direção descendente (Horn, 2002).
- b. **Exfiltração:** processo de saída do fluxo de água do substrato (Horn, 2002).
- c. **Percolação:** processo pelo qual a água migra para baixo através do perfil do solo, a partir da superfície (Delleur, 1999).
- d. **Taxa de infiltração:** volume de água que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo (Delleur, 1999).
- e. **Capacidade de infiltração:** quantidade máxima de água que pode infiltrar no solo, em um dado intervalo de tempo (Delleur, 1999).
- f. **Saturação:** porcentagem máxima de água contida nos vazios de um solo (Caputo, 1988).
- g. **Permeabilidade:** propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele (Caputo, 1988).
- h. **Condutividade hidráulica:** é a medida da descarga específica em relação ao gradiente hidráulico, refletindo a facilidade com que um líquido flui e a capacidade de um meio poroso de permitir a passagem desse líquido (Horn, 2002).
- i. **Setup** (η): pode ser definido como um aumento induzido pela onda no nível médio da água (Gourlay, 1992)
- j. **Set-down:** diminuição induzida por ondas no nível médio de mar, que ocorre nos pontos de quebra, onde a tensão de radiação está no máximo (Horn, 2002).
- k. **Runup:** altura vertical máxima acima do nível da água atingida pela onda ascendente (Gourlay, 1992).
- l. **Run-down:** altura vertical mais baixa atingida pelo refluxo de uma onda antes que a próxima onda comece a subir a praia (Gourlay, 1992).
- m. **Swash (espraiamento):** oscilação da água para cima (*uprush*) e para baixo (*backwash*) na praia subaérea (Horn, 2002).
- n. **Zona de swash:** distância horizontal atingida pelo espraiamento; região em que a face da praia é intermitentemente exposta à atmosfera (Elfrink & Baldock, 2002).
- o. **Lençol freático:** superfície de equilíbrio na qual a pressão da água dos poros é igual à pressão atmosférica (Horn, 2002)

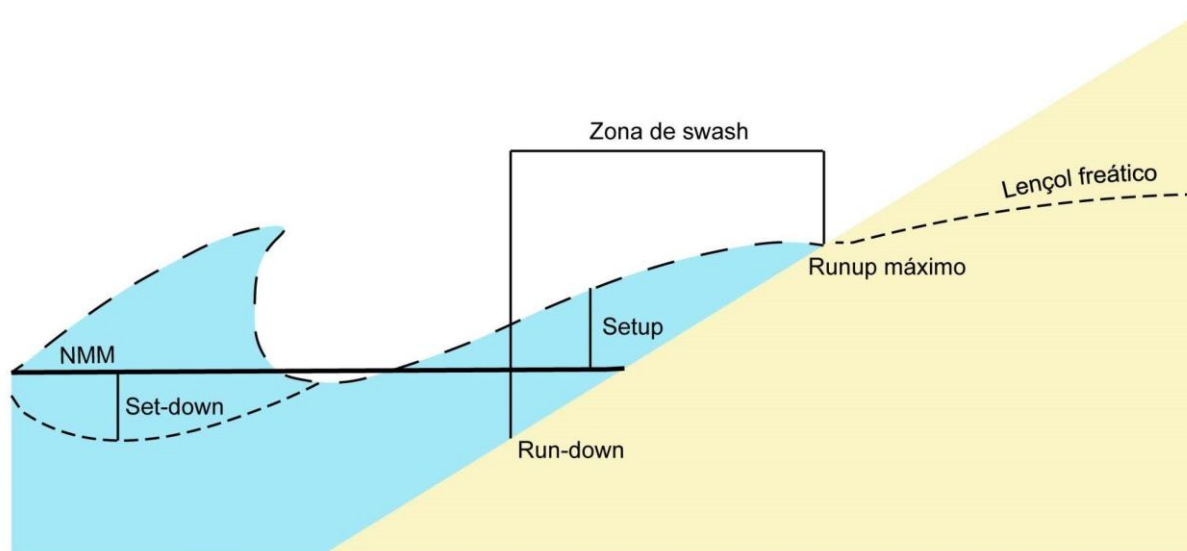


Figura 1.3: Definição dos níveis de água superficial e subsuperficial na zona de *swash*. Adaptado de Horn (2002).

1.5.3. Coeficiente de Permeabilidade

Os solos consistem em partículas sólidas com espaços vazios entre elas (Head, 1982). Os vazios interconectados no solo permitem que a água flua de pontos de alta energia para pontos de baixa energia devido à permeabilidade (Das, 2007). A permeabilidade (k) pode então ser definida como a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o grau de permeabilidade expresso numericamente pelo "coeficiente de permeabilidade" (Caputo, 1988).

O coeficiente de permeabilidade, expresso em termos de velocidade, varia para os diferentes solos e, para um mesmo solo, dependendo de diferentes fatores, incluindo a granulometria, forma e textura das partículas, índice de vazios, grau de saturação e estrutura do solo (Taylor, 1948; Beard & Weyl, 1973; Head, 1982). Além disso, outras características do solo como grau de compactação, relação finos/arenosos e presença de argila ou matéria orgânica também influenciam a permeabilidade (Felton & Ali, 1992; Bennett et al., 2002; Kim et al., 2010; Oliveira & Nicolodi, 2017).

Com relação à granulometria, a permeabilidade nas areias diminui à medida que o tamanho do grão se torna mais fino e a seleção se torna mais pobre, já que quanto menores forem as partículas, menores serão os espaços vazios entre elas e maior será a resistência ao fluxo (Beard & Weyl, 1973; Head, 1982). Em oposição, quanto maior o índice de vazios, como no caso dos pedregulhos, maior o coeficiente de permeabilidade (Head, 1982). Além disso, McLachlan & Turner (1994) afirmam que a permeabilidade diminui drasticamente com a adição de areia muito fina, ou

especialmente de silte, devido ao seu efeito de preenchimento e ao bloqueio dos vazios. Com base no diâmetro, valores típicos de permeabilidade podem ser esperados para diferentes tamanhos de grãos (Tab. 1.1).

Tabela 1.1: Ordens de grandeza de valores de k (cm/s). Adaptado de Ortigão (2007)

Tipo de Solo	K (cm/s)
Pedregulhos	$>10^{-3}$
Areias	10^{-3} a 10^{-5}
Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}

No que tange a forma, a permeabilidade do meio poroso se deteriora à medida que o formato da partícula se desvia da esfera, já que partículas alongadas ou irregulares criam caminhos de fluxo mais tortuosos (Head, 1982; Song et al., 2024). Acerca da estrutura, solos estratificados, compostos por uma camada de silte e uma camada de areia, por exemplo, têm uma permeabilidade vertical muito inferior a horizontal (Lambe & Whitman, 1969; Head, 1982). Além disso, segundo Head (1982), descontinuidades como fissuras, lentes de silte ou areia, bolsas de material orgânico, podem provocar efeitos sobre o coeficiente de permeabilidade. Oliveira & Nicolodi (2007) demonstram que, em ambientes fluviais, a presença de lentes de cascalho aumentam o coeficiente de permeabilidade, enquanto a existência de rochas ou paleossolos diminui a infiltração vertical. Bennett et al. (2002) afirmam que sedimentos bioturbados com buracos ou tocas também podem apresentar alta permeabilidade.

A definição do coeficiente de permeabilidade é feita com base na lei de Darcy, de acordo com a qual a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. A Lei de Darcy enuncia que a vazão do fluxo que percola por uma amostra de solo é diretamente proporcional à diferença de carga hidráulica, e inversamente proporcional ao comprimento da amostra na direção do fluxo (Bicalho et al., 2015). Assim sendo, adicionando uma constante de proporcionalidade, que vem a ser o coeficiente de permeabilidade (k), a Lei de Darcy pode ser escrita como $Q = k \times i \times A$, onde Q é a vazão que percola pela amostra de solo; k é o coeficiente de permeabilidade; i é o gradiente hidráulico; e A é a área da seção transversal total da amostra.

A determinação da permeabilidade pode ser realizada a partir de métodos diretos ou indiretos. Nos métodos diretos, o coeficiente de permeabilidade é determinado através de ensaios de campo ou de laboratório. Os ensaios de laboratório

são realizados com permeâmetros, aplicando-se a condição de carga constante ou de nível variável. Segundo Oliva et al. (2005), o teste em um nível constante envolve manter o nível da água em uma posição fixa durante todo o teste, o que pode ser obtido adicionando água (testes de infiltração) ou removendo água (testes de bombeamento). O permeâmetro de carga constante é utilizado para solos arenosos e consiste em verificar a variação de volume que atravessa uma seção transversal da amostra em um determinado tempo (Caputo, 1988). O teste com nível variável, por sua vez, é indicado para solos argilosos com baixa permeabilidade e consiste em medir a variação de nível da descarga durante um intervalo de tempo (Caputo, 1988).

Entre os ensaios de campo, o mais famoso é o de "tubo aberto" (Fig. 1.4). O método consiste em monitorar o tempo necessário para que o fluido atravessasse uma altura predeterminada de um cilindro cravado no terreno a ser estudado (Caputo, 1988). Esses valores são posteriormente inseridos na fórmula: $k = \frac{r}{4 \times h} \times \frac{\Delta h}{\Delta t}$.



Figura 1.4: Ensaio de 'tubo aberto'. (A) Ensaio de permeabilidade ao óleo. Fonte: Lopes (2016). (B) Tubo mostrando os níveis de variação. Fonte: Pereira (2005)

Nos métodos indiretos, o coeficiente de permeabilidade é estimado a partir de equações empíricas, que relacionam a condutividade hidráulica com características representativas dos sedimentos. A determinação do coeficiente de permeabilidade a partir de fórmulas empíricas utiliza dados granulométricos, principalmente o tamanho médio do grão, o teor de umidade e o índice de vazios, e características do fluido (viscosidade e densidade). Algumas fórmulas famosas (Tab. 1.2) e recomendadas para o ambiente praiado (Rosas et al., 2014) incluem a de Hazen (1892, 1911), Kozeny-Carman, Harleman et al. (1963), Beyer (1964) e Chapuis et al. (2004).

Tabela 1.2: Equações recomendadas para estimar a condutividade hidráulica para depósitos praias.
Fonte: Rosas et al. (2014)

Autor	Equação	Variáveis	β	Uso
Hazen (1892)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{\nu} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2$	g: gravidade v: viscosidade cinemática	6×10^{-4}	$0.1 < d_{10} < 3\text{mm}$
Hazen (1911)	$K \left[\frac{cm}{s} \right] = \beta C d_{10}^2$	C é o coeficiente de Hazen d_{10} em cm	1	$100 < C < 150$
Kozeny-Carman	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{10}^2$	n: porosidade μ : viscosidade dinâmica ρ : densidade do fluido	1/18 0	Siltos, areias e areias com cascalho $d_{10} < 3\text{mm}$
Harleman et al. (1963)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{\rho g}{\mu} d_{10}^2$		6.54×10^{-4}	
Beyer (1964)	$K \left[\frac{m}{s} \right] = \beta \frac{g}{\nu} \log \frac{500}{C} d_{10}^2$	C é o coeficiente de uniformidade	6×10^{-4}	$0.06 < d_{10} < 0.6\text{mm}$ $1 < C < 20$
Chapuis et al. (2004)	$K \left[\frac{cm}{s} \right] = \beta \left(\frac{d_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0.7825} ; e = \frac{n}{1-n}$	e: índice de vazios d_{10} em mm	2.46 22	$0.1 < d_{10} < 3\text{mm}$ $0.3 < e < 0.7$

1.5.4. Turfeiras

A turfa é um acúmulo de restos parcialmente decompostos ou não decompostos de material vegetal que, como um sedimento orgânico, tem propriedades geotécnicas incomuns, incluindo compressibilidade, baixa densidade e uma natureza fibrosa (Evans & Wartburton, 2007).

Os depósitos de turfas nas regiões do Jardim do Éden, no litoral norte do RS e no Hermenegildo no litoral sul do RS são descritos como moderadamente compactados, de cor cinza a preta, compostos de lama rica em matéria orgânica (70%), intercalada com finas camadas de areia com biodetritos, respectivamente por Travessas et al. (2005); Dillenburg et al. (2009) e Lima et al. (2013). Essa camada aflora, normalmente, após eventos de ressacas junto a base das dunas frontais, com idades de: $1,19 \pm 0,5$ ka AP no Jardim do Éden (Tomazelli et al., 1995; 1998), $1,060 \pm 70$ ka AP no Farol da Conceição (Dillenburg et al., 2004), e $2,47 \pm 0,6$ ka AP no Balneário do Hermenegildo (Tomazelli et al., 1998).

A origem mais comum desses ambientes paludiais está claramente associada ao processo natural de colmatção de corpos d'água costeiros (lagos e lagoas), que são progressivamente tomados pela vegetação à medida que seus níveis de águas diminuem (Tomazelli & Villwock, 1991). A combinação de encharcamento, da anóxia e da vegetação permite a umidificação e a mineralização da matéria orgânica, dando origem às turfeiras (Lima et al., 2020). Na costa do RS a formação desses depósitos

está relacionada à evolução da barreira costeira (Dillenburg et al., 2004; Travessas et al., 2005; Lima et al., 2020).

O ponto culminante do nível relativo do mar pós-glacial foi alcançado em 5.6 ka, com o nível do mar aproximadamente 2 a 3 m acima do atual (Barboza & Tomazelli, 2003; Dillenburg et al., 2004; Barboza et al., 2021). Naquela época, uma barreira com comportamento transgressivo, controlada pelo aumento relativo do nível do mar, estava localizada em *offshore* em relação a linha de costa atual, como indicado pelo afloramento de lamas lagunares (datado de 6.551 anos cal BP) na atual zona litorânea (Dillenburg et al., 2000; 2009) (Fig. 1.5A).

De 5.6 ka até o presente, a barreira holocênica se deslocou em sentido ao continente (Fig. 1.5C e D), sendo a transgressão da linha de costa controlada por um balanço negativo de sedimentos, já que a barreira foi submetida à erosão de longo prazo causada pela concentração da energia das ondas nos setores com projeções (mais íngreme) da costa (Dillenburg et al., 2000; Lima et al., 2013). Durante esse intervalo erosivo, a barreira recuou aproximadamente 2 km (Dillenburg et al., 2004; Travessas et al., 2005) e grandes quantidades de areias foram transportadas para o continente, levando ao assoreamento das lagoas de retro barreira, e à redução da profundidade desses sistemas lagunares, criando condições ótimas para o estabelecimento de plantas aquáticas adaptadas ao alagamento, que deram origem aos depósitos de turfas (Lima et al., 2020) (Fig. 1.5B).

O processo de transporte de areias para o interior do continente, e a consequente transgressão da barreira associada a colmatação dos corpos d'água, foi promovido por dois mecanismos principais: a formação dos campos de dunas transgressivos durante as estações secas, e a progradação da margem lagunar por deltas e por sangradouros formados nos interdunas durante as estações úmidas (Lima et al., 2013; Rosa et al., 2016).

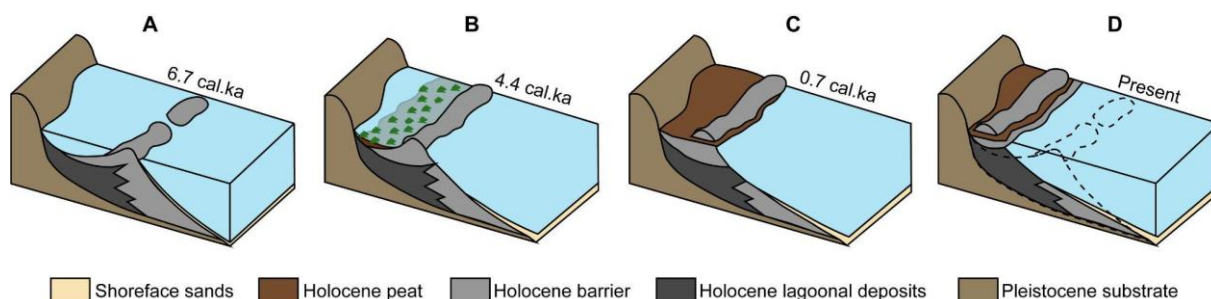


Figura 1.5: Estágios que caracterizam o modelo evolutivo da barreira holocênica no Hermenegildo (esquemático e não em escala). (A) posicionamento de uma barreira transgressiva (5.6 ka); (B, C e D) recessão da barreira e transgressão dos campos de dunas entre 6,7 ka e o presente devido a um balanço negativo de sedimentos. Adaptado de Lima et al. (2013).

1.6. Estado da arte no Brasil:

Alguns estudos realizaram testes de permeabilidade para determinar tanto a sua relação com as características locais, quanto o seu papel nos processos praias. Outros, mediram a permeabilidade em praias arenosas brasileiras no contexto da vulnerabilidade ao óleo. A grande maioria desses testes foram realizados utilizando o ensaio de tubo aberto de Caputo (1988). O método consiste em cravar um tubo de sondagem no terreno, enchê-lo com água, e medir a velocidade com que a água escoou pelo tubo e se infiltra no terreno (Caputo, 1988).

Na costa do RS, Klein & Calliari (1997) verificaram a permeabilidade no pós-praia entre o Balneário do Cassino e a Barra do Chuí e descobriram que a variabilidade espacial está relacionada diretamente à distribuição granulométrica causada pela geologia regional. Esse resultado foi confirmado por Pereira & Calliari (2005). Segundo os autores, as variações na permeabilidade das praias arenosas do RS refletem tanto os estágios morfodinâmicos, quanto a herança geológica da planície costeira do estado, sendo essa herança atribuída à presença localizada de sedimentos grossos com seleção reduzida. Ambos os trabalhos também relacionam a permeabilidade à presença de depósitos paludiais, já que a ocorrência desses favorece uma rápida saturação do solo. Testes de permeabilidade também foram realizados por Vieira et al. (2004) e por Lopes et al. (2007) para determinar a influência da circulação de veículos na praia do Balneário do Cassino. Ambos os trabalhos encontraram valores distintos de permeabilidade entre os pontos sobre a trilha de veículos e fora delas: o tráfego de veículos provoca a compactação da areia, diminuindo o coeficiente de permeabilidade.

No contexto da vulnerabilidade ao óleo, Pereira & Calliari (2005), Costi & Calliari (2008), e Oliveira & Nicolodi (2017), realizaram ensaios de tubo aberto em praias oceânicas e lagunares na costa do RS a fim de determinar a profundidade de penetração e o volume de sedimentos contaminados. Pereira & Calliari (2005), verificaram que a densidade do fluido não influencia o valor do coeficiente de permeabilidade em areias de granulometria mais grossa, como o caso da Praia dos Concheiros. Entretanto, praias de areias finas como a do Balneário do Cassino, apresentam valores de permeabilidade até quatro vezes menores para o óleo. Costi & Calliari (2008) encontraram maior penetração do óleo em sedimentos de maior granulometria e com grau de seleção mais pobre. Ademais, praias com características intermediárias têm maior probabilidade de apresentar variações no volume contaminado ao longo do tempo. Oliveira & Nicolodi (2017), determinaram que a permeabilidade em praias lagunares do Sistema Patos-Guaíba no RS é governada pelo tamanho e pelo arredondamento do grão, e é favorecida pelo grau de seleção, pela distribuição vertical dos sedimentos e pelo percentual de cascalho. Os autores concluíram que a distribuição polimodal dos sedimentos associada à baixa mobilidade do sistema são responsáveis pelos maiores valores de permeabilidade em praias lagunares.

Estudos na região Nordeste incluem os trabalhos de Locatelli et al. (2015), Lopes (2016), Cunha et al. (2016), Raposo (2018), Castro et al. (2021) e Ramos (2022). Locatelli et al. (2015) investigaram o comportamento do espalhamento do óleo diesel em areias da praia de Suape (Pernambuco) e perceberam que a penetração depende tanto das características do solo e do fluido, quanto da tensão superficial na interface óleo-grão-água. Lopes (2016) e Cunha et al. (2016) analisando os efeitos da sazonalidade climática na permeabilidade de diferentes óleos em praias do Pará, perceberam que durante o período chuvoso a permeabilidade apresentou os menores valores, concluindo assim que a umidade é o fator influente na variação sazonal da permeabilidade em praias oceânicas com sedimentos homogêneos e bem selecionados.

Raposo (2018) ao verificar a influência da permeabilidade na erosão de falésias nas praias de Panaquatira e Olhos D'Água na Ilha do Maranhão, descobriu que baixos valores de permeabilidade contribuem para a diminuição da infiltração e para a geração de *runoff*, contribuindo para a erosão das feições. Castro et al. (2021) ao caracterizar as praias do Banho e do Caúra no município de São José de Ribamar,

Maranhão, verificaram que, ao contrário do esperado, houve um menor coeficiente de permeabilidade na praia com grãos maiores (areia média-grossa). Segundo os autores, isso ocorreu devido ao fato de a praia estar localizada perto de um canal fluvial, que provoca a saturação do pacote, diminuindo a permeabilidade. Ramos (2022) atribui à saturação a responsabilidade pela variação da permeabilidade nas praias oceânicas da Ilha do Maranhão. Outro ponto abordado é o maior valor de permeabilidade encontrado na zona mais erosiva da Praia da Ponta d'Areia (MA), que foi atribuído à existência de sedimentos grossos oriundos da erosão de falésias próximas.

No Rio de Janeiro, Costa (2020) utilizou um permeâmetro de parede flexível sob carga hidráulica constante para caracterizar a permeabilidade da Praia de Ipanema. O autor realizou ensaios com diferentes índices de vazios para verificar os efeitos da compactação e descobriu uma tendência de redução da permeabilidade com a diminuição do índice de vazios da amostra. Na região amazônica, Oliveira (2014) examinou a permeabilidade em praias fluviais e estuarinas amazônicas e concluiu que a permeabilidade não possui padrão uniforme, sendo a granulometria, textura e umidade preponderantes nos resultados. Além disso, o arredondamento é mais importante do que o tamanho do grão em algumas praias, facilitando a infiltração e elevando o valor da permeabilidade.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DOS ESTUDOS DE PERMEABILIDADE EM PRAIAS USANDO TÉCNICAS COMPUTACIONAIS

Elaine B.de Oliveira & Eduardo G. Barboza

Submetido e publicado na Revista Pesquisas em Geociências

<https://doi.org/10.22456/1807-9806.136152>

Resumo:

A permeabilidade é um parâmetro importante na determinação das equações de fluxo e no transporte de sedimentos praias. Este estudo avaliou os estudos de permeabilidade e condutividade hidráulica em praias, analisando o desempenho e a estrutura de pesquisa, através de uma revisão sistemática da literatura. A base de dados foi composta por 51 artigos retirados da plataforma *Web of Science*. A análise dos dados foi compilada usando as ferramentas *Tree of Science*, *VOSviewer* e *Altrimetric Bookmarklet*. Os resultados mostraram que a principal fonte de divulgação dos artigos foi o "*Journal of Coastal Research*" e que os países com a maior parte das publicações e colaborações foram os EUA e a Inglaterra. As redes de conexão mostram uma baixa colaboração entre os diferentes subgrupos de pesquisa, porém uma boa ligação entre os autores de um mesmo grupo. Gear Masselink foi o autor mais influente no tema. Os dados da plataforma Altrimetric mostram que o tema não recebe muita atenção social. Os resultados dessa revisão posicionaram a permeabilidade na pesquisa costeira e apontaram lacunas, principalmente a falta de medições da permeabilidade *in situ*, que ainda precisam ser investigadas nos diferentes ramos de pesquisa.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica; *Tree of Science*; *VOSviewer*; Fluxo; Morfologia

2.1. Introdução

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido escoar através de uma matriz sedimentar porosa. Em muitos trabalhos a permeabilidade e a condutividade hidráulica são usadas como sinônimos, porém, segundo Horn (2002) os termos têm significados diferentes: enquanto a permeabilidade considera apenas as características do meio poroso, a condutividade hidráulica considera também as características do fluido. Independente da nomenclatura, a permeabilidade (ou

condutividade hidráulica) da praia tem sido mencionada em diversas áreas das pesquisas costeiras, como por exemplo nos estudos de geomorfologia praial, engenharia costeira, contaminação, ou na modelagem de descarga subterrânea.

Uma das principais menções da permeabilidade nos estudos costeiros está relacionada às taxas de infiltração durante os ciclos de *swash* e ao transporte transversal de sedimentos (Turner & Masselink, 1998; Butt et al., 2001; Quick, 1991; Masselink & Li, 2001; Elfrink & Baldock, 2002). A infiltração em praias secas (insaturadas, permeáveis) reduz a velocidade da retrolavagem (*backwash*) e prolonga a existência de um fluxo laminar, promovendo o transporte em direção ao continente e a deposição de sedimentos na face de praia, enquanto em uma praia úmida (saturada, impermeável), a velocidade de retrolavagem acelerada devido à adição de água subindo à superfície na zona de efluente promove a erosão pela ação das ondas (Grant, 1948; Masselink & Li, 2001; Li et al., 2002; Kulkarni et al., 2004). Dado que a erosão costeira é um dos principais processos que impactam as praias globalmente (Souza, 2009) e que as iniciativas para conter, recuperar e manter as áreas costeiras são dispendiosas para os cofres públicos (Carmo, 2013), promover uma compreensão aprimorada do transporte de sedimentos e dos fatores que o influenciam é essencial.

A avaliação de diferentes aspectos de pesquisas nas áreas de dinâmica e transporte de sedimentos na zona de *swash* foi abordada por uma série de revisões bibliográficas (Mclachlan & Turner, 1994; Butt & Russell, 2000; Mason & Coates, 2001; Elfrink & Baldock, 2002; Horn, 2002; Masselink & Puleo, 2006; Horn, 2006; Briganti et al., 2016). Adicionalmente, equações empíricas empregadas na estimativa da condutividade hidráulica foram sintetizadas por Chapius (2012) e Rosas et al. (2014). Essas revisões apresentam características explanatórias e descritivas do fluxo e caracterizam o estado da arte sobre o campo de pesquisa, porém a permeabilidade não foi o foco dessas pesquisas. Há carência de estudos que integrem os diferentes campos relacionados à permeabilidade em praias, demonstrando a estrutura e ramificações da pesquisa, assim como o enquadramento da permeabilidade em cada ramo. Além disso, a maioria das revisões realizadas já possuem mais de duas décadas, e, portanto, não trazem os avanços do campo nos últimos anos. Por fim, não foram encontrados estudos utilizando uma abordagem bibliométrica para determinar as tendências da pesquisa.

A abordagem bibliométrica utiliza dados estatísticos e quantitativos para processar e analisar publicações, através de técnicas de performance (definição das

contribuições e relações entre autores, revistas e países), ou mapeamento científico (identificação da estrutura, evolução e lacunas da pesquisa) (Broadus, 1987; Solorzano & Plevris, 2022). Com o avanço da tecnologia, surgiram diversos softwares para a automatização dessas análises. As principais vantagens na utilização de técnicas computacionais são a capacidade de avaliar um grande volume de dados em uma única vez, e a geração de outputs gráficos que facilitam a comunicação e transmissão da informação. Devido a essas vantagens, diferentes técnicas computacionais e indicadores cientométricos vem sendo aplicadas em diferentes áreas do conhecimento (Van Eck & Waltman, 2010; Fernandes & Silva, 2018; Patrus & Silva, 2019; Guo et al., 2019; Mishra et al., 2020; Ankrah et al., 2022; Basumatary et al., 2023).

Apesar de figurar em publicações que abrangem os domínios da engenharia e das ciências do solo, a permeabilidade ainda carece da atenção necessária para compreender sua importância nos processos costeiros e para orientar o desenvolvimento das pesquisas ao longo do tempo. Esta lacuna pode ser preenchida por meio de uma revisão bibliográfica. Uma análise sistemática da literatura tem o potencial não apenas de destacar a permeabilidade nas pesquisas costeiras, mas também de oferecer uma visão abrangente do estado atual do conhecimento, apontando áreas específicas que demandam investigação adicional.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os estudos de permeabilidade em praias, analisando a performance e a estrutura da pesquisa através de técnicas computacionais, e discutindo a presença da permeabilidade ou condutividade hidráulica em cada ramo encontrado. Devido à confusão de nomenclaturas, como mencionado por Horn (2002), no presente trabalho os termos permeabilidade e condutividade hidráulica foram considerados equivalentes.

2.2. Materiais e Métodos

Esta pesquisa foi baseada em uma revisão sistemática de literatura, de caráter quantitativo descritivo, para analisar o crescimento e as tendências da pesquisa sobre permeabilidade em praias. A Figura 2.1 ilustra o processo de fluxo de coleta e análise de dados bibliográficos.

Os dados bibliográficos foram coletados da base de dados “*Web of Science*” (WoS), acessada a partir do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio da Comunidade Acadêmica

Federada (CAFe), usando login e senha da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os dados foram pesquisados usando os termos de pesquisa [("beach" OR "beaches") AND ("permeability" OR "hydraulic conductivity") AND ("sediment" OR "morphology")] na seção "Títulos dos artigos, Resumo, Palavras-chave". Esta pesquisa retornou 97 dados bibliográficos. A seguir, na etapa de elegibilidade, foram aplicados filtros de categorias de forma a obter uma base de dados coerente e alinhada com o campo de estudo, eliminando assim trabalhos não relacionados ao tema. Os artigos relacionados à descarga de águas subterrâneas foram descartados, por ser uma área já bem explorada em revisões qualitativas e quantitativas (Mclachlan & Turner, 1994; Burnett et al., 2003; Slomp & Van Cappellen, 2004; Horn, 2006; Robinson et al., 2018; Ma & Zhang, 2020; Sekar et al., 2022; Afrifa et al., 2022; Gyanendra et al., 2022). Os resultados (N = 51) foram exportados com a extensão TXT.

A análise de dados foi realizada em três etapas. A primeira parte da análise dos dados (medição de desempenho, mapeamento científico e visualização de rede de conexões) foi realizada com o auxílio do software *VOSviewer* (Van Eck & Waltman, 2010). Nessa etapa foram analisadas a influência e conexões dos autores, países, fontes, e palavras-chave dos dados bibliográficos levantados. A segunda parte da análise foi realizada com o *Altmetrics Bookmarklet*¹, um script disponibilizado gratuitamente pela plataforma *Altmetric*, que disponibiliza métricas de compartilhamento de diversas plataformas sociais, incluindo *Facebook*, *Twitter*, *Wikipedia*, blogs, sites de notícia, documentos de políticas públicas e dados da plataforma de gerenciamento de referências *Mendeley*. Os dados coletados foram transferidos para o Microsoft Excel para análise posterior.

Para a estruturação e evolução dos estudos sobre o tema, primeiramente os artigos foram classificados em grupos através da análise de conteúdo (utilizando as palavras-chave, objetivos e descobertas). Posteriormente, cada grupo foi organizado de forma cronológica a fim de identificar a evolução temporal. A partir da evolução temporal, foram identificadas as relações entre os grupos, estabelecendo as sinergias e o percurso de desenvolvimento, que foram organizadas na forma de um mapa mental. A etapa de evolução foi executada com o auxílio da plataforma "*Tree of Science*" (*ToS*) (Robledo et al., 2014). Esta plataforma permite uma análise

¹ Disponível em <https://www.altmetric.com>

sistematizada para identificar artigos relevantes em três indicadores: (i) raiz, que representa os artigos que originam o campo do conhecimento; (ii) tronco, composto pelos links entre os artigos tradicionais e modernos; (iii) e folhas, que são os trabalhos mais recentes sobre o tema (Zuluaga et al., 2022).

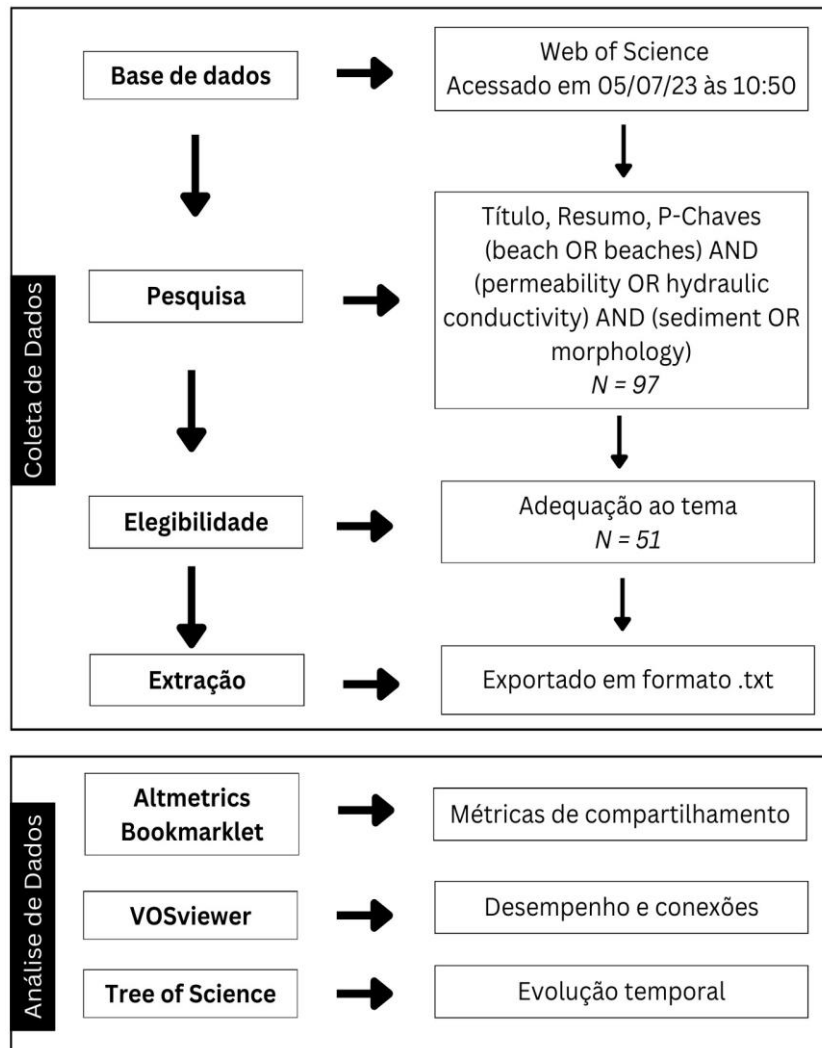


Figura 2.1: Fluxograma do processo metodológico. Elaborado pelos autores com uso do Canvas

2.3. Resultados

2.3.1. Desempenho

2.3.1.1. Documentos mais citados

A análise dos dados bibliográficos constatou que a publicação mais citada (NC = 232) no tema foi publicada por Carson et al. (2011). O artigo, publicado pela *“Marine Pollution Bulletin”*, apresenta mudanças físicas no pacote sedimentar praiado provocado pela contaminação por microplásticos. A Tabela 2.1 mostra as sete publicações com mais de 50 citações. Os dois primeiros artigos da lista possuem características

multidisciplinares, transitando entre diferentes áreas de conhecimento, o que favorece a citação por diferentes grupos, ampliando seu alcance e poder de divulgação.

Tabela 2.1: As sete publicações mais citadas para os estudos de permeabilidade em praias. NC refere-se ao número de citações.

#	Título	Autores	Jornal	DOI	NC
1	Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments	Carson et al. (2011)	Marine Pollution Bulletin	10.1016/j.marpolbul.2011.05.032	232
2	Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments	Cheng et al. (2014)	Geotechnique	10.1680/geot.14.T.025	149
3	Determination of Hydraulic Conductivity from Grain-Size Distribution for Different Depositional Environments	Rosas et al. (2014)	Groundwater	10.1111/gwat.12078	92
4	Sediment transport processes on mixed beaches: A review for shoreline management	Mason & Coates (2001)	Journal of Coastal Research		87
5	The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study	Masselink & Li (2001)	Marine Geology	10.1016/S0025-3227(01)00161-X	83
6	Measurements and modeling of beach groundwater flow in the swash-zone: a review	Horn (2006)	Continental Shelf Research	10.1016/j.csr.2006.02.001	82
7	Modeling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G	McCall et al. (2015)	Coastal Engineering	10.1016/j.coastaleng.2015.06.002	66

2.3.1.2. Autores mais produtivos

A análise dos dados bibliográficos constatou que o autor mais produtivo no tema pesquisado, considerando o número de publicações e citações, foi Gerd Masselink (Universidade de Plymouth, Inglaterra) com quatro publicações de sua autoria/coautoria e 132 citações. O segundo autor, com duas publicações e 125 citações foi Diane P. Horn (Universidade de Londres, Inglaterra). Esses dois autores são responsáveis por quase 12% das publicações totais. A Tabela 2.2 mostra os nove autores com mais de uma publicação e que contribuíram significativamente para o campo.

Tabela 2.2: As sete publicações mais citadas para os estudos de permeabilidade em praias. NP = número de publicações; NC = número de citações

#	Autor	Afiliação	País	NP	NC	h-Index
1	Gerd Masselink	University of Plymouth	Inglaterra	4	132	44
2	Diane P. Horn	University of London	Inglaterra	2	125	12
3	Thomas M. Missimer	Florida Gulf Coast University	EUA	2	94	21
4	Ian Turner	University of New South Wales Sydney	Austrália	2	59	45
5	Daniel Buscombe	Northern Arizona University	EUA	2	43	21
6	Hailong Li	Southern University of Science and Technology	China	2	37	32
7	Michel C. Boufadel	New Jersey Institute of Technology	EUA	2	22	33
8	M Poff	Coastal Engn Consultants Inc	EUA	2	0	0
9	MF Stephen	Coastal Engn Consultants Inc	EUA	2	0	2

2.3.1.3. Países mais produtivos

Os países com o maior número de publicações estão listados na Tabela 2.3 com a porcentagem de participação global e o total de citações. Os Estados Unidos foram o país que conduziram a maior parte das pesquisas sobre permeabilidade em praias, com 18 documentos, seguido pela Inglaterra com 14. Os dois países juntos somam quase 63% das publicações globais e possuem o dobro de citações que o restante. Esse resultado está alinhado com a análise dos principais autores, comprovando que ambos os países são líderes nas pesquisas relacionadas ao tema. O Brasil encontra-se na nona posição, com três documentos e 35 citações.

Tabela 2.3: A lista dos 10 países mais produtivos na pesquisa sobre os estudos de permeabilidade em praias com base no número de publicações. NP e NC representam o número de publicações e citações. A participação se refere ao total geral de artigos (N=51).

Posição	País	NP	NC	Participação%
1	EUA	18	524	35,29
2	Inglaterra	14	531	27,45
3	Austrália	5	238	9,80
4	China	4	88	7,84
5	Canadá	4	34	7,84
6	Escócia	3	111	5,88
7	Países Baixos	3	105	5,88
8	Espanha	3	62	5,88
9	Brasil	3	35	5,88
10	Itália	2	30	3,92

2.3.1.4. Periódicos mais produtivos

A Tabela 2.4 mostra as 10 revistas mais proeminentes nos estudos de permeabilidade em praias, classificadas com base no número de publicações, no total de citações e no Fator de Impacto. A análise da pesquisa mostra que o periódico “*Journal of Coastal Research*” é o que possui o maior número de publicações (10). Entretanto, esse periódico apresenta o menor fator de impacto (1,11) entre os 10 mais influentes. Um dos fatores que poderiam explicar o alto número de publicações nessa revista é uma maior facilidade no processo de submissão ou aceitação, ou mesmo a maior popularidade do Jornal entre os autores da área. A segunda posição é ocupada por “*Coastal Engineering*”, com cinco publicações, 175 citações e um fator de impacto de 5,427. O jornal com maior fator de impacto (7,001) é o “*Marine Pollution Bulletin*”, que aparece na quarta posição.

Tabela 2.4: A lista dos 10 periódicos mais produtivos na pesquisa sobre permeabilidade de praias com base no número de publicações. NP e NC representam o número de publicações e citações

#	Periódico	Editora	e-ISSN	NP	NC	Fator de Impacto
1	Journal of Coastal Research	Coastal Education & Research Foundation	1551-5036	10	215	1,11
2	Coastal Engineering	Elsevier	1872-7379	5	175	5,427
3	Groundwater	Wiley-Blackwell	1745-6584	3	150	2,887
4	Marine Pollution Bulletin	Elsevier	1879-3363	2	235	7,001
5	Continental Shelf Research	Elsevier	1873-6955	2	117	2,629
6	Marine Geology	Elsevier	1872-6151	2	104	3,627
7	Journal of Geophysical Research - Ocean	Wiley-Blackwell	2169-9291	2	33	3,938
8	Ocean & Coastal Management	Elsevier	1873-524X	2	32	4,6
9	Geotechnique	Institution of Civil Engineers	1751-7656	1	149	5,8
10	Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	Elsevier	1872-616X	1	47	3

2.3.2. Conexões

2.3.2.1. Colaboração entre Autores

Um dos indicadores de colaboração entre autores é a coautoria em publicações (Bordons & Gómez, 2000). Esse tipo de colaboração pode ser expresso em formato de rede, onde os nós representam os autores e as linhas retratam as conexões entre eles (Newman, 2004). Um total de 171 autores foram encontrados entre as 51 publicações. Os 171 autores estão agrupados em 44 clusters de diferentes tamanhos, estando a maioria desconectados (Fig. 2.2). O cluster é formado pelo agrupamento de autores que são coautores em diversas pesquisas e publicaram artigos sobre tópicos semelhantes. Portanto, o grande número de clusters indica tanto uma ramificação dos tópicos de estudo, quanto uma falta de colaboração entre autores de um mesmo campo. As cores amarelo, vermelho, verde e azul na Figura 2.2 representam os maiores clusters, compostos por pelo menos 8 pessoas, enquanto a cor cinza foi escolhida para representar clusters menores e com menos conexões. Os autores que compõem os quatro maiores clusters estão descritos no Quadro 2.1.

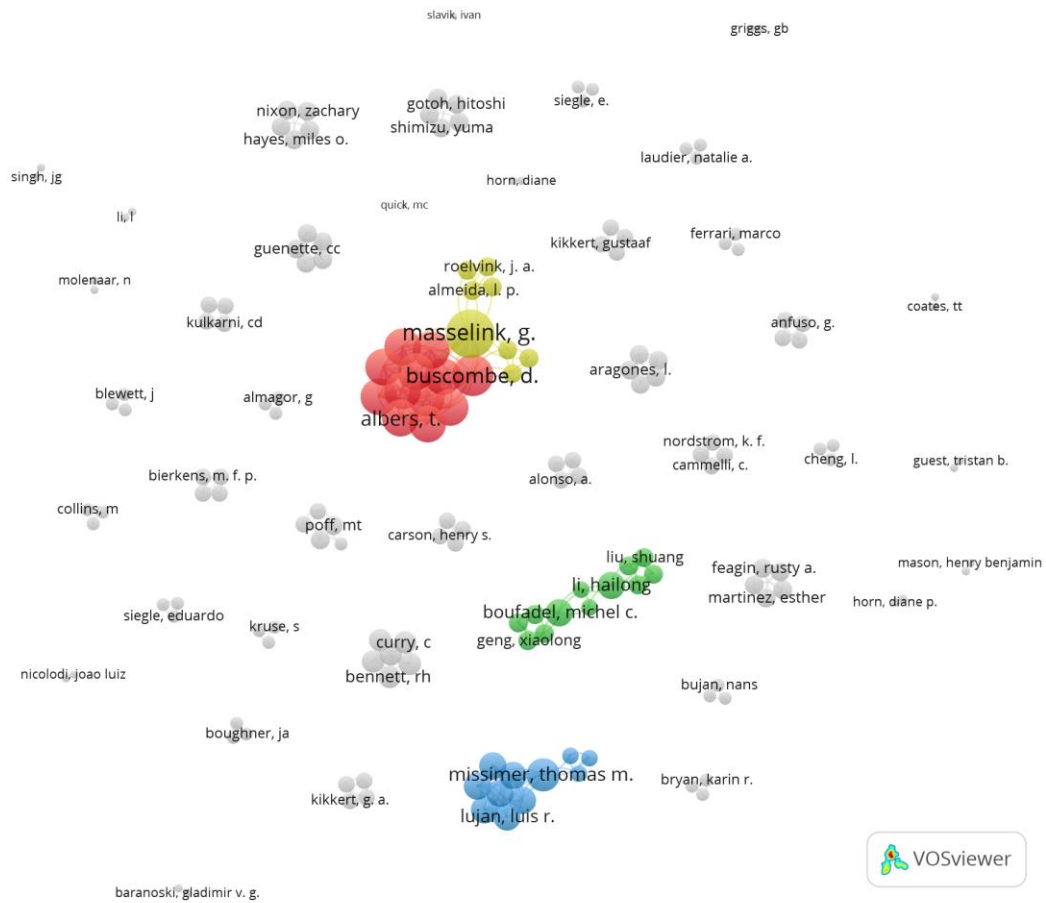


Figura 2.2: Clusters indicando a colaboração entre autores. O alto número de clusters indica uma ramificação dos tópicos de estudos e uma falta de colaboração entre autores de um mesmo tópico. A cor cinza representa clusters menores e com um menor número de conexões. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer.

Quadro 2.1: Clusters dos autores colaborativos mais ativos. O cluster é formado pelo agrupamento de autores que são coautores em diversas pesquisas e publicaram artigos sobre tópicos semelhantes.

CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Albers, T.	Bobo, A.M.	Coulibaly, K.M.	Almeida, L.P.
Bradbury, A.	Boufadel, M.C.	Dehwah, A.H.A.	Masselink, G.
Buscombe, D.	Chen, S	Goso, C.	McCall, R.T.
Chapman, D.	Geng, X.	Hegy, M.C.	Poate, T.G.
Coates, I.	Heiss, J.W.	Lopes, O.	Roelvink, J.A.
Ferreira, O.	Khoury, N.	Lujan, L.R.	Swinkels, C.
Matias, A.	Lee, K.	Maliva, R.G.	Turner, I.L.
Metje, N.	Li, H.	Mantilla, D.	Williams, J.J.
Pan, S.	Liu, S.	Missimer, T.M.	
Thompson, C.	Michael, H.A.	Rosas, J.	
Turner, I.	Sun, P.	Sesler, K.	
Williams, J.	Xia, Y.		

Dos 171, apenas 20 autores estão conectados em uma rede de colaboração, exibida na Figura 2.3. O tamanho dos nós na Figura 2.3 está associado ao número de

publicações de cada autor, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre autores. O autor mais colaborativo foi Gear Masselink (NP = 4, NC = 132) com 19 conexões. O segundo autor com o maior número de conexões foi Daniel Buscombe (NP = 2, NC = 43) com 15 links. É importante mencionar que, apesar de não haver sobreposição e cada autor ser designado para apenas um cluster (van Eck & Waltman, 2023), há casos em que o mesmo autor aparece em clusters distintos devido à uma variação no nome publicado, como por exemplo Ian Turner, que aparece em dois clusters diferentes como Turner, I. e Turner, I.L (Fig. 2.3).

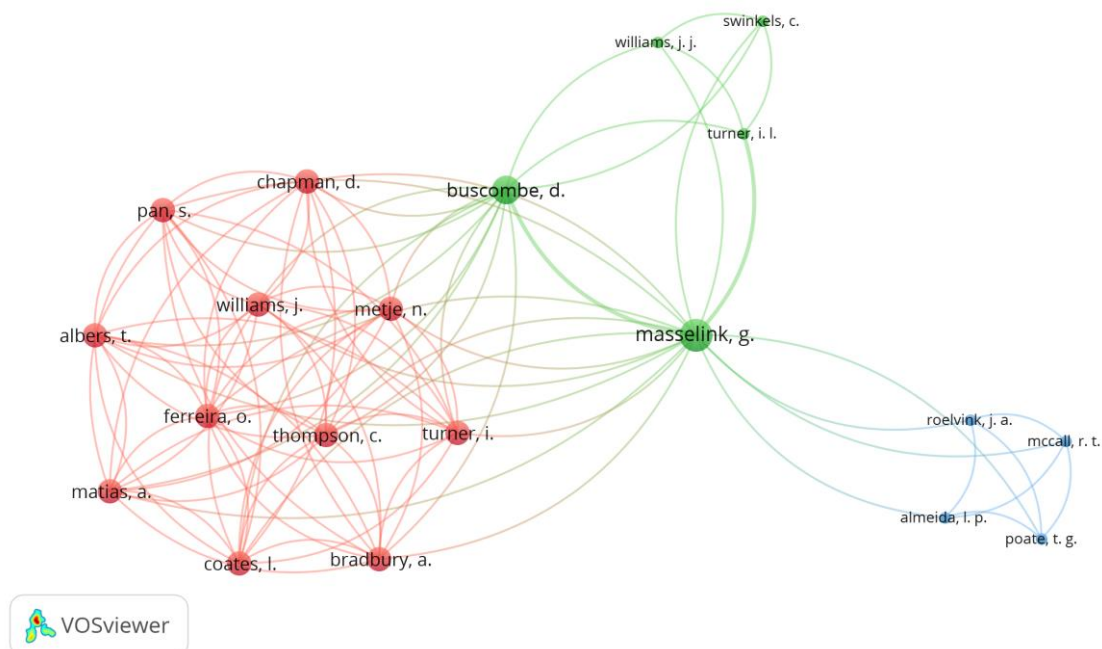


Figura 2.3: Rede de colaboração entre autores. Os nós representam os autores, e as linhas representam as conexões entre eles. O tamanho dos nós está associado ao número de publicações de cada autor, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre autores. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer.

2.3.2.2. Colaboração entre Países

Um total de 24 países foram encontrados entre as 51 publicações. Desses, 20 estão conectados na rede de colaboração criada a partir do software *VOSviewer* (Fig. 2.4). O tamanho dos nós está associado ao número de publicações em cada país, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre eles. O país mais colaborativo com 12 conexões foi a Inglaterra (NP = 14, NC = 531), seguido pelos Estados Unidos da América com 10 conexões (NP = 73, NC = 2375).

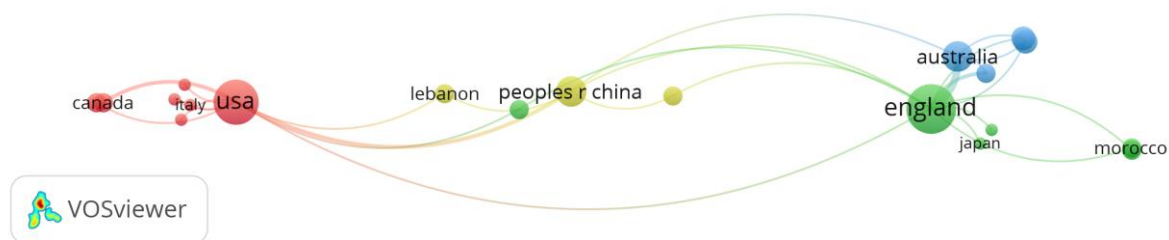


Figura 2.4: Rede de colaboração entre países. Os nós representam os países, e as linhas representam as conexões entre eles. O tamanho dos nós está associado ao número de publicações, enquanto a espessura da linha de conexão representa a força da colaboração entre países. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer.

2.3.3. Palavras-chave

A análise verificou todas as palavras-chave, incluindo tanto as palavras fornecidas pelos autores originais, quanto as chamadas “*Keyword plus*”, que são aquelas extraídas por algoritmos dos títulos das referências citadas pela Web of Science (Zhang et al., 2016). A Figura 2.5 apresenta a análise de co-ocorrência das palavras-chave considerando pelo menos três ocorrências. Os nós da Figura 2.5 representam a frequência de aparecimento das palavras-chave, enquanto a linha representa a associação entre elas. Das 305 palavras encontradas no conjunto de dados, 30 satisfazem os requisitos e estão conectadas na rede. Dinâmica (“*Dynamics*”) foi a palavra-chave com o maior número de ocorrências (oito) e o maior número de conexões (23). Ela foi seguida por Permeabilidade com oito ocorrências e 16 links (“*Permeability*”). A Tabela 2.5 apresenta as 10 palavras-chave mais proeminentes. É importante mencionar que algumas palavras aparecem em diferentes formatos. Cascalho (“*Gravel*”), por exemplo, aparece tanto sozinho, quanto acompanhado pela palavra praia (“*Gravel Beach*”), assim como “*Run-up*”, que também aparece junto da palavra onda (“*Wave Run-up*”).

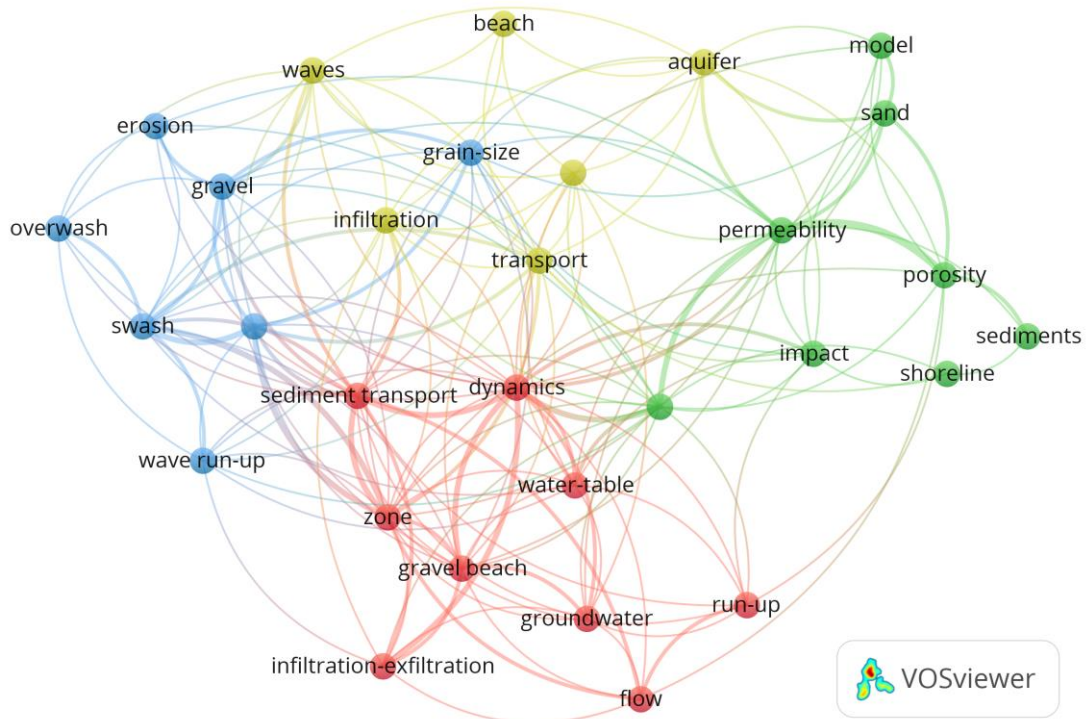


Figura 2.5: Co-ocorrência de palavras-chave. A cor do cluster representa o grupo de palavras-chave associadas, enquanto o tamanho dos nós representa a frequência de ocorrência. Elaborado pelos autores com o uso de VOSviewer.

Tabela 2.5: As 10 principais palavras-chave com base em sua ocorrência. N representa o número de ocorrências. Links se refere ao número de conexões. A força total do link (FTL) refere-se à soma das forças dos links conectados a determinadas palavras-chave.

#	Palavra	Tradução	N	Links	FTL
1	<i>Dynamics</i>	Dinâmica	8	23	35
2	<i>Permeability</i>	Permeabilidade	8	16	24
3	<i>Sediment transport</i>	Transporte de Sedimentos	7	18	29
4	<i>Porosity</i>	Porosidade	7	9	14
5	<i>Zone</i>	Zona	6	18	27
6	<i>Hydraulic conductivity</i>	Condutividade Hidráulica	6	17	22
7	<i>Swash</i>	Lavagem	6	14	23
8	<i>Transport</i>	Transporte	5	15	18
9	<i>Sediments</i>	Sedimentos	5	3	4
10	<i>Gravel beach</i>	Praia de cascalho	4	15	20

As palavras estão agrupadas em quatro clusters de cores diferentes (Quadro 2.2), que acompanham o alinhamento dos temas de pesquisa. O cluster vermelho inclui nove palavras relacionadas principalmente ao fluxo vertical e à dinâmica do lençol freático. O cluster verde é composto por oito palavras ligadas principalmente à determinação e estimativa da condutividade hidráulica. O cluster azul é composto por

sete palavras e é focado nos processos e impactos do fluxo na praia. O cluster amarelo possui seis palavras ligadas ao transporte e contaminação por óleo.

Quadro 2.2: Clusters das principais palavras-chave sobre o papel da permeabilidade na morfologia praial. O cluster é formado pelo agrupamento de palavras com tópicos semelhantes

CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Dynamics	Hydraulic conductivity	Erosion	Aquifer
Flow	Impact	Grain-size	Beach
Gravel beach	Model	Gravel	Exxon-valdez oil
Groundwater	Permeability	Overwash	Infiltration
Infiltration-exfiltration	Porosity	Swash	Transport
Run-up	Sand	Swash infiltration-exfiltration	Waves
Sediment transport	Sediments	Wave run-up	
Water-table	Shoreline		
Zone			

2.3.4. Atenção social: Altmetric Bookmarklet

Dos 51 artigos que compõem a base bibliográfica extraída do WoS, 41 possuem DOI (identificador de objeto digital) e estão indexados nas bases de dados, facilitando a recuperação de dados de engajamento on-line. Entre esses 41, apenas 15 possuem dados de compartilhamento na plataforma Altmetric. A análise desses 15 artigos mostrou que as mídias sociais ainda são pouco utilizadas como meio de divulgação nos trabalhos envolvendo a permeabilidade em praias (Tab. 2.6). O *Twitter*, no entanto, parece ser a plataforma mais usada, com um total de 61 postagens. 11 publicações foram mencionadas pelo menos uma vez na plataforma, enquanto o trabalho de Huizer et al. (2019) teve um total de 20 tweets. O trabalho de Carson et al. (2011) apresentou a maior diversidade de plataformas, tendo sido mencionado no *Tweeter* (cinco), *Wikipedia* (um), Canais de Notícias (três) e documentos políticos (três). O maior engajamento desse trabalho reflete novamente as características multidisciplinares e a relevância do tema microplásticos não apenas para os acadêmicos, mas também para a sociedade em geral.

Tabela 2.6: Atenção social das publicações sobre permeabilidade e praia, incluindo o compartilhamento e menções on-line em diferentes mídias sociais e o número de leitores na plataforma Mendeley.

Leitores	Compartilhamento e menções						
	<i>Tweeter</i>	<i>Facebook</i>	<i>Documentos políticos</i>	<i>Wikipedia</i>	<i>Notícias</i>	<i>Blog</i>	<i>Patentes</i>
1371	61	1	6	1	3	1	3

Com relação à quantidade de leitores no *Mendeley*, 15 artigos foram lidos, sendo que o trabalho de Carson et al. (2011) possui, sozinho, 726 leitores. O *Mendeley* é uma plataforma de gerenciamento de referências, que permite aos usuários adicionarem documentos a uma biblioteca pessoal, fornecendo assim estatísticas do número de leitores de uma determinada publicação. Os 1371 leitores no *Mendeley* estão distribuídos entre diferentes países ao redor do mundo. No entanto, 90,66% dos leitores (N=1243) são de regiões geográficas desconhecidas e apenas 3,5% (48 leitores) puderam ter sua localização reconhecida (Fig. 2.6). Esses leitores estão distribuídos entre 20 países, sendo a maioria do Brasil (N = 14).

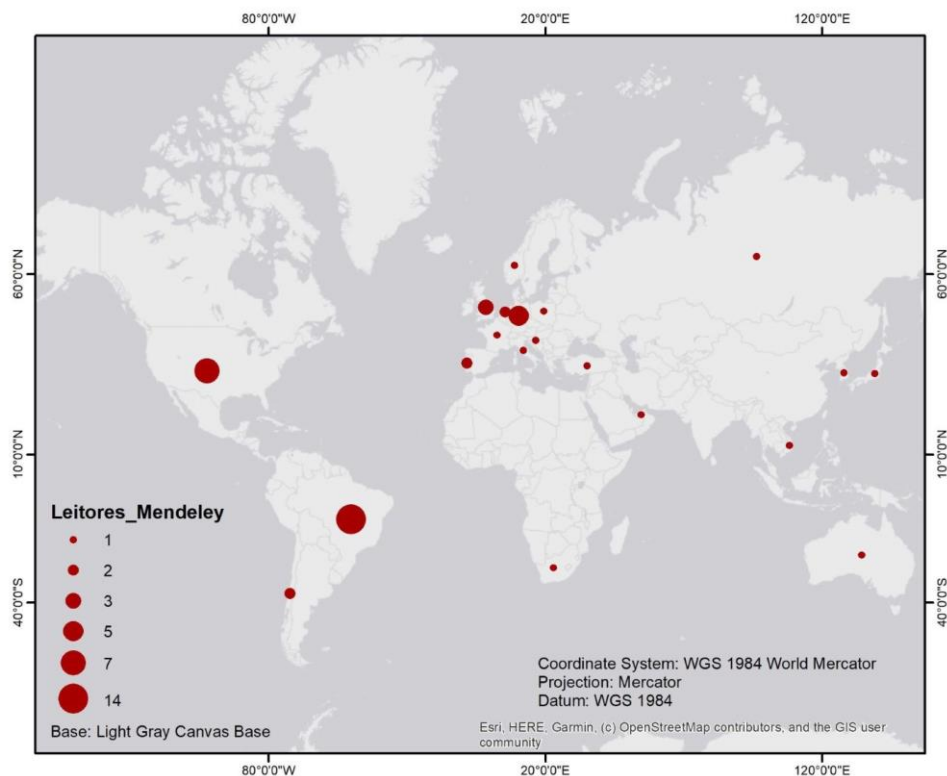


Figura 2.6: Mapa de distribuição dos leitores na plataforma Mendeley. O tamanho dos pontos representa o número de leitores. Elaborado pelos autores com o uso de ArcGIS®.

2.3.5. *Tree of Science (ToS)*

A análise da base bibliográfica extraída da *WoS* gerou uma árvore (*ToS*) com um número grande de raízes (20), uma quantidade média de troncos (10) e um baixo volume de folhas (seis). A Tabela 2.7 apresenta os artigos que compõem a árvore do conhecimento extraída da plataforma *ToS* sobre o papel da permeabilidade na morfologia de praias. É importante mencionar que é recomendado utilizar ao menos 100 registros dos resultados da pesquisa para gerar a rede de citações. De acordo

com Zuluaga et al. (2022), se tivermos menos registros do que o recomendado, podemos estar vendo apenas um ramo da árvore.

Desde que a nossa base bibliográfica apresentou apenas 51 registros, a árvore do conhecimento gerada pode ser considerada incompleta, e, provavelmente, o resultado é apenas um dos ramos de uma árvore maior. Dentro desta árvore, estão as pesquisas relacionadas à descarga submarina de águas subterrâneas, contemplando temas como descarga submarina, salinização de aquíferos, transporte de solutos e qualidade de reservatórios, temas que estão além dos objetivos desse trabalho e que já foram bem explorados em algumas revisões bibliográficas qualitativas e quantitativas (Mclachlan & Turner, 1994; Burnett et al., 2003; Slomp & Van Cappellen, 2004; Horn, 2006; Robinson et al., 2018; Ma & Zhang, 2020; Sekar et al., 2022; Afrifa et al., 2022; Gyanendra et al., 2022).

Tabela 2.7: Árvore do conhecimento sobre o papel da permeabilidade na morfologia de praias, mostrando a divisão entre os documentos que compõem a raiz, tronco e folhas da árvore.

Raiz	Tronco	Folhas
Hazen (1911)	Quick (1991)	McCall et al. (2015)
Bagnold (1940)	Mason & Coates (2001)	Guest & Hay (2017)
Krumbein et al. (1943)	Masselink & Li (2001)	Bujan et al. (2019)
Grant (1948)	Kulkarni et al. (2004)	Emami et al. (2019)
Folk & Ward (1957)	Horn & Li (2006)	Missimer et al. (2019)
Duncan Jr. (1964)	Horn & Walton (2007)	Geng et al. (2020)
Packwood (1983)	Williams et al. (2012)	
Longuet-Higgins & Smith (1983)	Masselink & Turner (2012)	
Carter & Orford (1984)	Rosas et al. (2014)	
Nielsen (1990)	Aragonés et al. (2015)	
Turner (1993)		
Masselink & Short (1993)		
Conley & Inman (1994)		
Turner (1995)		
Baird & Horn (1996)		
Turner et al. (1997)		
Turner & Masselink (1998)		
Butt et al. (2001)		
Horn (2002)		
Jennings & Shulmeister (2002)		

O uso do ToS com um número de registros abaixo do recomendado, apesar de não apresentar a evolução completa da pesquisa, foi útil na identificação de artigos relacionados ao tema, que originaram o conhecimento, e que não estão incluídos na base bibliográfica extraída do WoS, permitindo assim compreender melhor a divisão de grupos e evolução das linhas de pesquisa.

2.3.6. Agrupamento e Evolução

Por meio da análise de conteúdo, considerando as palavras-chave, objetivos e descobertas, procedeu-se à classificação dos artigos em oito grupos, sendo que a inclusão da permeabilidade em cada uma delas ocorre de maneira ligeiramente distinta (Tab. 2.8). O primeiro grupo, intitulado "Infiltração e transporte de sedimentos na zona de *swash*", emprega a permeabilidade como um parâmetro nas equações do fluxo e na movimentação sedimentar. O grupo "Mecanismos de controle das flutuações no nível de água" estabelece uma relação entre a permeabilidade, a presença de camadas impermeáveis e a saturação do pacote sedimentar. Essa associação entre saturação e camadas impermeáveis também é explorada no grupo "Processos e impactos do fluxo na praia". O grupo "Estruturas e estratégias de proteção contra a erosão costeira" consideram a importância da permeabilidade do leito em projetos de engenharia.

Os outros quatro grupos abordam diretamente a determinação da condutividade hidráulica, cada um com objetivos distintos. O grupo "Influência e propriedades sedimentológicas e hidráulicas na dinâmica do *swash*" incorpora a permeabilidade por meio da caracterização da heterogeneidade da condutividade hidráulica. Por sua vez, o grupo "Estimativa da condutividade hidráulica" inclui a permeabilidade nas equações de predição da condutividade hidráulica. Ambos os grupos "Determinação da permeabilidade in situ" e "Permeabilidade do petróleo em praias arenosas" realizam medidas da permeabilidade em campo, sendo que o primeiro utiliza água como fluido percolante, enquanto o segundo utiliza hidrocarbonetos como fluido.

Uma das formas de entender a evolução geral do tema é através do uso de cronologia. Segundo Oliveira et al. (2019), a cronologia ajuda a ilustrar tanto a evolução geral de cada grupo ao longo dos anos, quanto a maturidade (volume de publicações) das subáreas de investigação, permitindo identificar os eixos de pesquisa que representam os grupos com maior necessidade de desenvolvimento. A cronologia de cada grupo foi realizada com o auxílio dos resultados obtidos no ToS e pode ser visualizada na Figura 2.7.

Através da cronologia dos grupos de estudos, podemos perceber um adensamento das pesquisas a partir dos anos 2000. Além disso, as pesquisas relacionadas à simples descrição do transporte de sedimentos evoluíram para avaliar os impactos do fluxo nas variações morfológicas da praia. Além disso, as propriedades

do pacote sedimentar começaram a ser consideradas na movimentação do fluxo nas últimas duas décadas. Finalmente, a condutividade hidráulica estimada a partir de equações por mais de um século, passou a ser comparada com medições in situ. Essas relações entre os grupos deram suporte para a criação do mapa de interações exibido na Figura 2.8.

A partir da permeabilidade podemos visualizar três ramos principais da pesquisa. A primeira relacionada diretamente à determinação da permeabilidade, que pode ser medida ou estimada; a segunda relacionada à descrição da infiltração e transporte de sedimentos; e a terceira concentrada nos mecanismos controladores do fluxo. Nesses dois últimos ramos, a permeabilidade é apenas um parâmetro de entrada nas equações do fluxo. Os processos e impactos do fluxo são um corolário da junção entre os dois ramos, enquanto as estruturas e estratégias de proteção costeira são um efeito colateral do último.

Os resultados permitem estabelecer uma linha de pesquisa que inicia com a definição dos processos e mecanismos do fluxo. A descrição do transporte de sedimento e o papel das ondas levou à quantificação das variações morfodinâmicas nas praias, que impulsionou os estudos de proteção costeira. Além disso, conforme a permeabilidade ganhava notoriedade no campo, surgiram ramificações para quantificar a importância da condutividade hidráulica tanto nos processos, quanto na permanência de contaminantes.

Tabela 2.8: Agrupamento do campo de pesquisa em subcategorias. A forma de inclusão da permeabilidade em cada grupo também é mostrada.

Grupo	Objetivo	Palavras-chave	Inclusão da Permeabilidade	Autores
<i>Infiltração e transporte de sedimentos na zona de swash</i>	Descrever os processos de fluxo verticais na zona de <i>swash</i> e a relação com o transporte transversal de sedimentos na praia	<i>Swash</i> ; <i>Uprush</i> ; <i>backwash</i> ; transporte de sedimentos; pressão de poros; face da praia; infiltração; exfiltração; cascalho; morfologia	Permeabilidade é um dos parâmetros-chave na determinação da magnitude do fluxo e da movimentação do sedimento	Grant (1948); Turner & Masselink (1998); Butt et al. (2001); Quick (1991); Masselink & Li (2001); Elfrink & Baldock (2002)
<i>Mecanismos de controle das flutuações no nível de água</i>	Verificar o efeito de forçantes, como ondas, marés e tsunamis, na hidrodinâmica e nas flutuações do lençol freático	Fluxo; lençol freático; <i>runup</i> ; ondas; infiltração; marés; cascalho; permeável; onda solitária; modelo; tsunami; tempestade	Infiltração em condições saturadas, efeitos de uma camada impermeável, influência das variações da condutividade hidráulica	Nielsen (1990); Zelt (1991); Turner et al. (1997); Gedik et al. (2005); Williams et al. (2009); Laudier et al. (2011); Tsurudome et al. (2020)
<i>Processos e impactos do fluxo na praia</i>	Analisar a morfodinâmica, as variações morfológicas e as alterações do perfil da praia induzidas pelas ondas	<i>Swash</i> ; cascalho; infiltração; exfiltração; morfodinâmica; <i>overwash</i> ; <i>overtopping</i> ; tempestades; morfologia; erosão; evolução da praia	Efeito da variabilidade da condutividade hidráulica; relação entre saturação e morfologia; efeitos de uma camada impermeável	Kulkarni et al. (2004); Horn & Li (2006); Pedrozo-Acuña et al. (2006); Laudier et al. (2011); McCall et al. (2015); Emami et al. (2019)
<i>Estruturas e estratégias de proteção contra a erosão costeira</i>	Verificar a eficiência de métodos protetivos no combate à erosão costeira e acompanhar as modificações provocadas pelas estruturas	Proteção da costa; erosão; molhes; engordamento (<i>nourishment</i>); quebramar; morfodinâmica; morfologia costeira; modelagem numérica; Boussinesq	Estruturas costeiras permeáveis versus impermeáveis; importância da permeabilidade do leito em projetos de engenharia	McFarland et al. (1994); Cammelli et al. (2006); Horn & Walton (2007); Reis & Gama (2010); Postacchini et al. (2016); Martinez et al. (2020)
<i>Influência das propriedades sedimentológicas e hidráulicas na dinâmica do swash</i>	Verificar os efeitos da heterogeneidade do pacote (ex. permeabilidade, porosidade e rugosidade) na dinâmica da zona de lavagem	Ar; <i>swash</i> ; dinâmica; heterogeneidade; humidade; capilaridade; permeabilidade; porosidade; tensão; rugosidade	Heterogeneidade da condutividade hidráulica; fundos impermeáveis; praias permeáveis	Kikkert et al. (2009); Steenhauer et al. (2009); Dai & Kikkert (2013); Guest & Hay (2017); Geng et al. (2020)
<i>Estimativa da condutividade hidráulica</i>	Investigar analiticamente a relação entre o tamanho dos grãos e a permeabilidade, definindo métodos empíricos para estimar a condutividade hidráulica.	Condutividade hidráulica; permeabilidade; previsão; equações; porosidade; tamanho de grão; sedimentos; areia	Equação de predição da condutividade hidráulica a partir de parâmetros sedimentares	Hazen (1911); Van Genuchten (1980); Shepherd (1989); Schaap et al. (2001); Chapuis (2004); Chapuis (2012); Rosas et al. (2014)
<i>Determinação da permeabilidade em situ</i>	Medição da condutividade hidráulica com uso de permeâmetro em sedimentos marinhos costeiros ou entre marés	Sedimentos; medição da permeabilidade; fundo do mar; condutividade hidráulica, permeâmetro	Medição da condutividade hidráulica através de permeâmetros e relação com as características sedimentares	Bennett et al. (2002); Forster et al. (2003); She et al. (2006); Li et al. (2010); Wang et al. (2014); Lee et al. (2015)
<i>Permeabilidade do Petróleo em Praias Arenosas</i>	Determinar a profundidade de penetração e tempo de persistência de hidrocarbonetos em praias arenosas	Exxon Valdez; óleo; persistência; sedimentos; derramamento de óleo; remediação permeabilidade	Ensaio para determinação da condutividade hidráulica; Persistência do óleo em praias permeáveis	Vandermeulen & Singh (1994); Owens et al. (2003); Bobo et al. (2012); Nixon et al. (2013); Oliveira & Nicolodi (2017); Nachite et al. (2020)

	Estimativa da condutividade hidráulica Hazen (1911) Kozeny (1927) Krumbein & Monk (1942)	Transporte de sedimentos na zona de swash Grant (1948) Duncan Jr. (1964)					
1911-1989	Bear (1972)		Mecanismos de controle do fluxo Packwood (1983) Kobayashi et al. (1987)		Estruturas e estratégias de proteção costeira		Permeabilidade do óleo em praias
	Shepherd (1989)						
1990-1999		Hughes et al. (1997) Masselink & Hughes, 1998 Turner & Masselink (1998)	Nielsen (1990) Zelt (1991) Baird & Horn (1996) Turner et al. (1997)		Dean (1991) Plant & Griggs (1992) Mcfarland (1994)		Vandermeulen & Singh (1994) Wise (1994)
							Hayes & Michel (1999)
2000 - 2008	Schaap et al. (2001)	Butt & Russell (2000) Shanehsaz-Z. et al. (2001) Butt et al. (2001) Masselink & Li (2001) Mason & Coates (2001) Elfrink & Baldock (2002) Austin & Masselink (2006)	Horn (2002) Kakinuma (2003) Gedik et al. (2005) Hsu et al. (2006)	Processos e impactos do fluxo na praia Kulkarni et al. (2004) Horn & Li (2006) Horn (2006) Pedrozo-Acuña et al. (2006)	Stephen (2000) Poff et al. (2000) Raudkivi & Dete (2002) Cammelli et al. (2006) Horn & Walton (2007)	Determinação da permeabilidade em situ Bennett et al. (2002) Forster et al. (2003) She et al. (2006)	Influência das propriedades sedimentológicas e hidráulicas Owens et al. (2003) Short et al. (2006)
2009 - 2013	Chapuis (2012)		Hafsia et al. (2009) Kikkert et al. (2012) Williams et al. (2012) Kikkert et al. (2013)	Williams et al. (2009) Bakhtyar et al. (2011) Laudier et al. (2011) Masselink & Turner (2012)	Reis & Gama (2010)	Li et al. (2010)	Kikkert et al. (2009) Steenhauer et al. (2009) Boufadel et al. (2010)
2014 - 2018	Rosas et al. (2014)			McCall et al. (2014) McCall et al. (2015)	Kobayashi, 2016 Postacchini et al. (2016) Beuzen et al. (2018)	Wang et al. (2014) Lee et al. (2015)	Dai & Kikkert (2013) Nixon et al. (2013)
2019-2020			Qu et al. (2019) Qiu & Mason (2019) Tsurudome et al. (2020)	Bujan et al. (2019) Emami et al. (2019)	Martinez et al. (2020)	Geng et al. (2020)	Oliveira & Nicolodi (2017) Nachite et al. (2020)

Figura 2.7: Linha do tempo para o campo de estudo "estudos de permeabilidade e condutividade em praias"

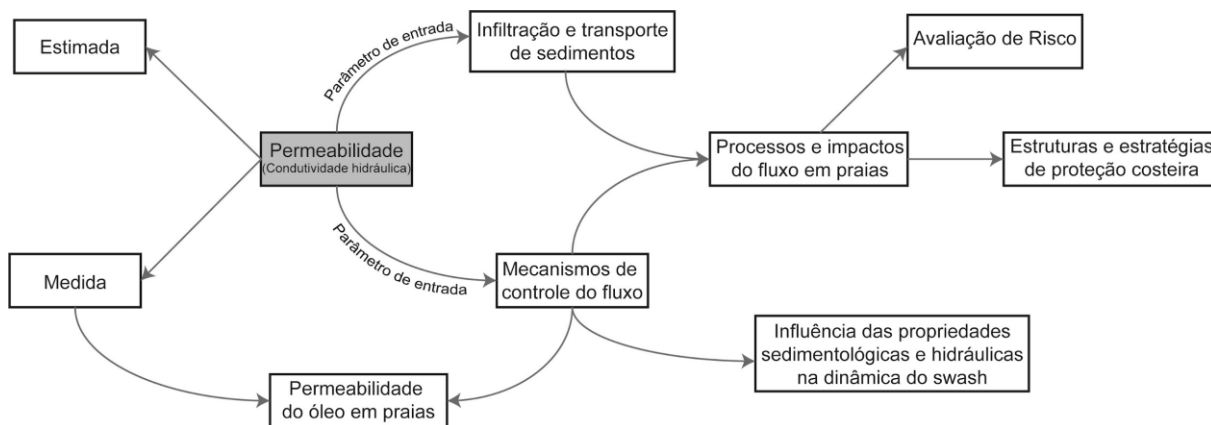


Figura 2.8: Mapa de interações do campo de pesquisa. Elaborado pelos autores

2.4. Discussão

A importância das praias no contexto econômico, cultural e ambiental, impulsionam cada vez mais as pesquisas para entender os processos e mecanismos reguladores da morfologia. A inclusão da permeabilidade nesses processos ainda é recente, no entanto, ela vem ganhando espaço ao longo do tempo, e tendo cada vez mais destaques dentro das pesquisas. Os resultados da Figura 2.7 mostram não só um adensamento do número de publicações a partir dos anos 2000, como também uma modificação na forma em que a permeabilidade é incluída nesses estudos, se antes ela era uma coadjuvante nas equações de fluxo, mais recentemente ela virou a protagonista das pesquisas, sendo o principal objeto de estudo (Tab. 2.8). Segundo Basumatary et al. (2023), o crescimento anual das publicações fornece uma visão geral do desenvolvimento, sendo que um aumento constante no número de publicações indica um avanço da pesquisa. O número total de publicações ao longo do tempo mostra uma tendência levemente crescente, mas alternada com períodos sem publicações. Essa tendência pode ser vista a partir de dois pontos de vista. Por um lado, a permeabilidade está pouco a pouco ganhando espaço dentro da comunidade, por outro, ainda é um campo relativamente mal explorado, com potencial de crescimento e aplicação em diversas áreas.

O mapa de interações, exibido na Figura 2.8, mostra uma visível progressão temática da pesquisa. Primeiramente, o objetivo dos trabalhos era entender o funcionamento dos processos de infiltração na zona de *swash* a fim de determinar se eles desempenham um papel significativo no transporte transversal de sedimentos. Essa linha começou com o trabalho de Grant (1948) e se estendeu até meados dos anos 2000 (Fig. 2.7). Uma segunda linha de pesquisa com foco em determinar o efeito

de forçantes, como ondas e marés, na hidrodinâmica praial surgiu na década de 80 com o trabalho de Packwood (1983), perdurando até os dias atuais (Qu et al., 2019; Qiu & Mason, 2019; Tsurudome et al., 2020). Essa linha se ramificou a fim de investigar mais profundamente os diferentes parâmetros (incluindo a permeabilidade) envolvidos na dinâmica da zona de lavagem.

A confirmação de que os processos de infiltração e exfiltração, associados às forçantes oceânicas, desempenham um papel no transporte transversal de sedimentos (Turner & Masselink, 1998; Austin & Masselink, 2006) impulsionou uma nova vertente que buscou entender as modificações morfológicas e as alterações no perfil praial provocadas por diferentes níveis de energia ou estratigrafia. A partir dessa linha, foi constatado que a permeabilidade possui uma relação com a erosão costeira (She et al., 2007), o que motivou estudos de engenharia, objetivando melhorar os métodos e estruturas de proteção costeira. Nessa fase, estudos compararam a eficiência de estruturas costeiras permeáveis versus impermeáveis (Poff et al., 2000; Postacchini et al., 2016) e verificaram como a permeabilidade pode afetar projetos de alimentação artificial (Cammelli et al., 2006; Horn & Walton, 2007). Concomitantemente, a permeabilidade passou a ser incluída em algumas análises de vulnerabilidade costeira, sendo considerada um fator de risco em áreas urbanizadas (Sousa et al., 2011, 2013). Nesses estudos a permeabilidade é estimada a partir da pavimentação do solo, portanto, quanto maior a pavimentação, menor a permeabilidade, e maior o risco de inundações (Sousa et al., 2011).

Ainda no contexto da vulnerabilidade, a permeabilidade também passou a ser considerada como fator de risco nos planos de contenção aos derramamentos de óleo, já que praias permeáveis, favorecem a percolação do óleo, aumentando o volume de sedimentos contaminados e, conseqüentemente, os impactos ambientais (Nixon et al., 2013). Esses estudos são motivados principalmente por acidentes e o número de publicações apresenta um pico após eventos de maiores proporções. Nessa linha de pesquisa, alguns estudos realizaram ensaios de permeabilidade com óleo a fim determinar as relações entre a condutividade hidráulica, as características sedimentares e o tempo de permanência do contaminante no ambiente (Pereira & Calliari, 2005; Costi & Calliari, 2008; Oliveira & Nicolodi, 2017).

A diversificação dos temas de estudo comprova a importância da permeabilidade nos processos praias. A permeabilidade foi incorporada inicialmente apenas como um parâmetro dentro das equações de fluxo. Depois foram investigados

os efeitos de um solo saturado ou de uma camada impermeável na movimentação. Recentemente, a heterogeneidade geológica da permeabilidade e a influência dessa variabilidade nos processos praias ganhou visibilidade. Já com relação à determinação da condutividade hidráulica, as equações de predição da condutividade hidráulica passaram a ser comparadas aos estudos de permeabilidade *in situ*, para determinar a eficácia dos métodos empíricos em diferentes ambientes deposicionais.

Especificamente com relação às métricas quantitativas, o escaneamento da produção e das redes de colaboração mostrou tanto os autores, países e revistas mais relevantes, quanto as tendências e lacunas da informação. Os resultados mostraram que a principal fonte de divulgação dos artigos foi o “Journal of Coastal Research” (Tab. 2.4). De acordo com Basumatary et al. (2023), os periódicos mais prolíficos revelam quais periódicos desempenham um papel importante na disseminação do conhecimento científico, fornecendo uma plataforma de compartilhamento. Gear Masselink foi o autor mais influente no tema (Tab. 2.2), visto que publicou o maior número de artigos, recebeu o maior número de citações e teve o maior número de colaborações, podendo ser considerado uma referência na área (Oliveira et al., 2018). Os países com a maior parte das publicações (Tab. 2.3) e colaborações (Fig. 2.4) foram os EUA e a Inglaterra.

As redes de conexão entre autores mostram uma baixa colaboração entre os diferentes subgrupos de pesquisa (Fig. 2.2), porém uma boa ligação entre os autores de um mesmo grupo (Fig. 2.3). A colaboração é um processo social, regido pela complexidade das interações humanas, onde cientistas altamente especializados se reúnem para enfrentar problemas científicos, compartilhando conhecimentos, experiências e técnicas (Bordons & Gómez, 2000; Franceschet & Costantini, 2010). A baixa correlação encontrada indica, portanto, que os resultados das pesquisas não estão sendo compartilhados entre as diferentes linhas de estudo e que o conhecimento gerado está segmentado.

As palavras-chave mais citadas foram dinâmica, permeabilidade, transporte, sedimentos, porosidade e zona (Fig.2.5). Palavras-chave são ferramentas fundamentais que atuam como porta de acesso aos textos científicos, agilizando a recuperação de documentos pelos mecanismos de pesquisa, e facilitando o processo de indexação nas bases de dados (Garcia et al., 2019). Segundo Basumatary et al. (2023), a análise de palavras-chave é essencial tanto para entender os principais conceitos e tópicos associados a um determinado campo de estudo, quanto para

revelar informações sobre as tendências atuais e emergentes. Logo, as palavras-chave encontradas nesse artigo mostram tanto a relevância dos conceitos propostos pelos dois grupos de pesquisa que originaram a discussão (Tab. 2.8), quanto a ausência de tendências fortes e emergentes.

Os dados “altimetrics” dessa pesquisa mostram que o tema não recebe muita atenção social (Tab. 2.6). Altimetrics são métricas alternativas que quantificam a influência e disseminação de trabalhos acadêmicos em plataformas como mídia social, sites de notícias online, blogs e sites de compartilhamento de pesquisas (Shamsi et al., 2022). Foram desenvolvidas para documentar o número de compartilhamentos em redes sociais (Sarika & Mohamed, 2023), sendo uma ferramenta valiosa para obter visibilidade no meio acadêmico, oferecendo diversas ferramentas que auxiliam os pesquisadores na localização, utilização e divulgação de informações (Fagbule, 2018). A falta de atenção social encontrada pode ser resultado da falta de divulgação por parte dos autores. Além disso, a teoria e base numérica atrelada aos estudos podem ser uma barreira para o entendimento e interesse do público.

Entre as lacunas do conhecimento encontradas e abordadas pelos próprios pesquisadores, temos principalmente a falta de medições da permeabilidade *in situ* (Baird & Horn, 1996; Hughes et al., 1997; Horn, 2006; Van Wellen, 2000; McCall et al., 2015). A grande maioria dos trabalhos que incorporam a permeabilidade nas equações de fluxo utilizam valores estimados de condutividade hidráulica. No entanto, Horn (2006) enfatiza que as propriedades hidráulicas dos sedimentos sofrem variações espaciais e temporais superiores às propriedades granulométricas, já que a mesma é suscetível às variações de umidade durante os ciclos de swash, à compactação vertical do pacote, aos diferentes graus de saturação da amostra e às alterações da granulometria. Isso significa que valores únicos e generalizados de condutividade podem não ser representativos. Portanto, valores medidos são necessários tanto para a melhoria dos métodos empíricos, quanto para a validação das modelagens numéricas ou para aumentar a compreensão das variações temporais e espaciais da permeabilidade em uma mesma praia.

Outras lacunas incluem a necessidade de examinar os efeitos do formato das partículas e da anisotropia das propriedades dos sedimentos na condutividade hidráulica (Turner, 1995; Guest & Hay, 2017; Geng et al., 2020); amplificar o conhecimento da permeabilidade em praias de diferentes granulometrias e sob

diversos regimes de marés (Baird & Horn, 1996; Horn, 2006; Guest & Hay, 2017); e a incorporação de um conjunto mais amplo de parâmetros, incluindo as propriedades físicas de praias porosas, nas simulações numéricas (Tsurudome et al., 2020). Especificamente com relação à alimentação artificial de praias, são necessárias mais informações sobre o desempenho e sobre os efeitos das características dos sedimentos na evolução do perfil praiial (Mason & Coates, 2001; Horn & Walton, 2007).

A limitação geográfica também pode ser apontada como uma das lacunas do conhecimento. A análise da base bibliográfica demonstrou que pesquisas foram realizadas em apenas 24 países, sendo que a grande maioria dos trabalhos estão localizados no hemisfério norte. Portanto, a expansão das pesquisas em países do hemisfério sul, que possuem características climáticas e morfológicas distintas, pode agregar informações para o campo de estudo.

2.5. Conclusões

A revisão sistemática realizada forneceu uma visão holística do atual estado das pesquisas de permeabilidade em praias, identificando tendências e lacunas, e dando direção às futuras pesquisas que podem ajudar a desenvolver o campo de estudo. Adicionalmente, a pesquisa mostrou como a permeabilidade é um ponto de conexão entre a superfície e subsuperfície da praia, influenciando os processos de troca de água e sedimentos e com grande potencial de aplicação devido à sua interdisciplinaridade e à possibilidade de servir como ponte entre os estudos terrestres e oceânicos.

Os parâmetros de seleção, como base de dados e termos de pesquisa, podem omitir artigos relevantes. Este estudo analisou 51 publicações da Web of Science, utilizando como termos de pesquisa a palavra praia, associada aos termos permeabilidade ou condutividade hidráulica, e sedimento ou morfologia. Estudos adicionais podem abranger mais publicações com diferentes bases de dados ou critérios de pesquisa, ampliando o conhecimento sobre a aplicabilidade da permeabilidade na zona costeira.

Agradecimentos: The authors acknowledge CECO and UFRGS.

Referências

- Afrifa, S.; Zhang, T.; Appiahene, P.; & Varadarajan, V. 2022. Mathematical and machine learning models for groundwater level changes: a systematic review and bibliographic analysis. *Future Internet*, 14(9): 259. [https:// doi.org/10.3390/fi14090259](https://doi.org/10.3390/fi14090259)
- Ankrah, J.; Monteiro, A.; & Madureira, H. 2022. Bibliometric analysis of data sources and tools for shoreline change analysis and detection. *Sustainability*, 14(9): 4895. [https:// doi.org/10.3390/su14094895](https://doi.org/10.3390/su14094895)
- Aragonés, L.; López, I.; Villacampa, Y.; Serra, J. C.; & Saval, J. M. 2015. New methodology for the classification of gravel beaches: adjusted on Alicante (Spain). *Journal of Coastal Research*, 31(4), p. 1023-1034. [https:// doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00140.1](https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00140.1)
- Austin, M. J.; & Masselink, G. 2006. Infiltration and Exfiltration on a Steep Gravel Beach: Implications for Sediment Transport. *Coastal Dynamics*, 26(20), p. 2503-2519. Doi:10.1061/40855(214)102
- Bagnold, R. A. 1940. Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank (includes photographs). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 15(1), p. 27-52.
- Baird, A. J.; & Horn, D. P. 1996. Monitoring and modelling groundwater behaviour in sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, p. 630-640. <https://www.jstor.org/stable/4298511>
- Basumatary, B.; Verma, A. K.; Kushwaha, S.; & Verma, M. K. 2023. Global research trends and performance measurement on biofloc technology (BFT): a systematic review based on computational techniques. *Aquaculture International*, p. 1-26. [https:// doi.org/10.1007/s10499-023-01162-z](https://doi.org/10.1007/s10499-023-01162-z)
- Bennett, R. H.; Hulbert, M. H.; Curry, C.; Johnson, H. P.; Hutnak, M. & Curry, K. J. 2002. In situ permeabilities of selected coastal marine sediments. *IEEE journal of oceanic engineering*, 27(3), p. 571-580. [https:// doi.org/10.1109/JOE.2002.1040939](https://doi.org/10.1109/JOE.2002.1040939)
- Bobo, A. M.; Khoury, N.; Li, H. & Boufadel, M. C. 2012. Groundwater flow in a tidally influenced gravel beach in Prince William Sound, Alaska. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(4), p. 478-494. [https:// doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000454](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000454)
- Bordons, M.; Gómez, I. 2000. Collaboration Networks in Science, in: Cronin, B. & Atkins, H.B. (Eds.). *The web of knowledge: A festschrift in honor of Eugene Garfield*. Information Today, New Jersey. 1st ed., p. 197-214.
- Briganti, R.; Torres-Freyermuth, A.; Baldock, T. E.; Brocchini, M.; Dodd, N.; Hsu, T. J.; Jiang, Z.; Kim, Y.; Pintado-Patiño, J.C.; & Postacchini, M. 2016. Advances in numerical modelling of swash zone dynamics. *Coastal Engineering*, 115, p. 26-41. [https:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.05.001)
- Broadus, R. N. 1987. Toward a definition of "bibliometrics". *Scientometrics*, 12, p. 373-379. [https:// doi.org/10.1007/BF02016680](https://doi.org/10.1007/BF02016680)
- Bujan, N.; Cox, R. & Masselink, G. 2019. From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size. *Marine Geology*, 417: 106012. [https:// doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106012)
- Burnett, W. C.; Bokuniewicz, H.; Huettel, M.; Moore, W. S. & Taniguchi, M. 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, 66, p. 3-33. [https:// doi.org/10.1023/B:BIOG.0000006066.21240.53](https://doi.org/10.1023/B:BIOG.0000006066.21240.53)
- Butt, T. & Russell, P. 2000. Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash-zone of natural beaches: a review. *Journal of coastal research*, p. 255-268. <https://www.jstor.org/stable/4300034>

- Butt, T.; Russell, P. & Turner, I. 2001. The influence of swash infiltration–exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore? *Coastal Engineering*, 2(1), p. 35-52. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00046-6)
- Cammelli, C.; Jackson, N. L.; Nordstrom, K. F. & Pranzini, E. 2006. Assessment of a gravel nourishment project fronting a seawall at Marina di Pisa, Italy. *Journal of Coastal Research*, p. 770-775. <https://www.jstor.org/stable/25741681>
- Carmo, J. S. A. 2013. Experiência de recuperação de um sistema dunar e proposta de instrumentos complementares de proteção, atração e valorização ambiental. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 13(3), p. 317-328. DOI:10.5894/rgci394
- Carson, H. S.; Colbert, S. L.; Kaylor, M. J. & McDermid, K. J. 2011. Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8). <https://doi.org/1708-1713>. 10.1016/j.marpolbul.2011.05.032
- Carter, R. W. G. & Orford, J. D. 1984. Coarse clastic barrier beaches: a discussion of the distinctive dynamic and morphosedimentary characteristics. *Developments in Sedimentology*, Vol. 39, p. 377-389. [https://doi.org/1016/S0070-4571\(08\)70155-9](https://doi.org/1016/S0070-4571(08)70155-9).
- Chapuis, R. P. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian geotechnical journal*, 41(5), p. 787-795. <https://doi.org/10.1139/t04-022>
- Chapuis, R. P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71, p. 401-434. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0418-7>.
- Cheng, L.; Shahin, M. A. & Cord-Ruwisch, R. 2014. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments. *Géotechnique*, 64(12), p. 1010-1013. <https://doi.org/10.1680/geot.14.T.025>.
- Conley, D. C. & Inman, D. L. 1994. Ventilated oscillatory boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 273, p. 261-284. <https://doi.org/10.1017/S002211209400193X>
- Costi, J.; & Calliari, L. J. 2008. Estimativa do volume sedimentar potencialmente contaminado em casos de derrame de óleo em condições de verão para praias arenosas do Rio Grande do Sul. In *RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2008, Rio de Janeiro. Anais...* Rio de Janeiro (8 p).
- Dai, H. & Kikkert, G. 2013. Characteristics Of The Entrained Air Bubble Cloud In The Swash-Zone. In: *World Congress of the International-Association-for-Hydro-Environment-Engineering-and-Research (IAHR)*, 35, 2013, Chengdu, China. Anais... Chengdu. Disponível em <https://hdl.handle.net/1783.1/58143>. Acesso em: 09 out. 2023.
- Duncan Jr, J. R. 1964. The effects of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development. *Marine Geology*, 2(3), p. 186-197. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(64\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(64)90039-8)
- Elfrink, B. & Baldock, T. 2002. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45(3-4), p. 149-167. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00032-7)
- Emami, A.; Bryan, K. R. & Lange, W. P. D. 2019. Spatial patterns in groundwater seepage and surf zone morphology: Muriwai Beach, New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 35(1), p. 186-195. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00180.1>
- Fagbule, O. F. 2018. Use of social media to enhance the impact of published papers. *Annals of Ibadan postgraduate medicine*, 16(1), p. 5-6.

- Fernandes, K. R. & da Silva, L. F. 2018. Inovação Tecnológica e o Alcance de Vantagem Competitiva Sustentável: Um Mapeamento da Literatura. In: EnANPAD, 42, 2018, Curitiba. Anais... Curitiba, ANPAD, p.1-16.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27(1), p. 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Forster, S.; Bobertz, B. & Bohling, B. 2003. Permeability of sands in the coastal areas of the southern Baltic Sea: mapping a grain-size related sediment property. *Aquatic Geochemistry*, 9, p. 171-190. <https://doi.org/10.1023/B:AQUA.0000022953.52275.8b>
- Franceschet, M. & Costantini, A. 2010. The effect of scholar collaboration on impact and quality of academic papers. *Journal of informetrics*, 4(4), p. 540-553. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.06.003>
- Garcia, D. C. F.; Gattaz, C. C. & Gattaz, N. C. 2019. A Relevância do Título, do Resumo e de Palavras-chave para a Escrita de Artigos Científicos. *Revista de Administração Contemporânea*, 23, p. 1-9. <https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2019190178>
- Gedik, N.; İrtem, E. & Kabdasli, S. 2005. Laboratory investigation on tsunami run-up. *Ocean Engineering*, 32(5-6), p. 513-528. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.10.013>
- Geng, X.; Heiss, J. W.; Michael, H. A.; Boufadel, M. C. & Lee, K. 2020. Groundwater flow and moisture dynamics in the swash zone: Effects of heterogeneous hydraulic conductivity and capillarity. *Water Resources Research*, 56(11), <https://doi.org/10.1029/2020WR028401>
- Grant, U. S. 1948. Influence of the water table on beach aggradation and degradation. *Journal of Marine Research*, 7(3). https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/694
- Guest, T. B. & Hay, A. E. 2017. Vertical structure of pore pressure under surface gravity waves on a steep, megatidal, mixed sand- gravel- cobble beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1), p. 153-170. <https://doi.org/10.1002/2016JC012257>
- Guo, Q.; Li, H.; Boufadel, M. C. & Sharifi, Y. 2010. Hydrodynamics in a gravel beach and its impact on the Exxon Valdez oil. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12). <https://doi.org/10.1029/2010JC006169>
- Gyanendra, Y.; Yumnam, G.; Alam, W. & Singh, C. I. 2022. A bibliometric analysis and assessment of scientific studies trend on groundwater research in India during 1989–2020. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(16): 1417. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10707-0>
- Hazen, A. 1911 Discussion of “Dams on Sand Foundations” by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 73, p. 199-203.
- Horn, D. & Li, L. 2006. Measurement and modelling of gravel beach groundwater response to wave run-up: effects on beach profile changes. *Journal of Coastal Research*, 22(5), p. 1241-1249. <https://doi.org/10.2112/06A-0006.1>
- Horn, D. P. & Walton, S. M. 2007. Spatial and temporal variations of sediment size on a mixed sand and gravel beach. *Sedimentary Geology*, 202(3), p. 509-528. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.023>
- Horn, D. P. 2002. Beach groundwater dynamics. *Geomorphology*, 48(1-3), p. 121-146. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00178-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00178-2)
- Horn, D. P. 2006. Measurements and modelling of beach groundwater flow in the swash-zone: a review. *Continental Shelf Research*, 26(5), p. 622-652. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.02.001>

- Hughes, M. G.; Masselink, G. & Brander, R. W. 1997. Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach. *Marine Geology*, 138(1-2), p. 91-103. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00014-5)
- Jennings, R. & Shulmeister, J. 2002. A field based classification scheme for gravel beaches. *Marine Geology*, 186(3-4), p. 211-228. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00314-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00314-6)
- Kikkert, G.; O'Donoghue, T.; Pokrajac, D. & Steenhauer, K. 2009. Effects of beach roughness and permeability on swash hydrodynamics. *Coastal Engineering*, 5, p. 798-809. https://doi.org/10.1142/9789814277426_0067
- Krumbein, W. C. & Monk, G. D. 1943. Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand. *Transactions of the AIME*, 151(01), p. 153-163. <https://doi.org/10.2118/943153-G>
- Kulkarni, C. D.; Levoy, F.; Monfort, O. & Miles, J. 2004. Morphological variations of a mixed sediment beachface (Teignmouth, UK). *Continental Shelf Research*, 24(11), p. 1203-1218. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.005>
- Laudier, N. A.; Thornton, E. B. & MacMahan, J. 2011. Measured and modeled wave overtopping on a natural beach. *Coastal Engineering*, 58(9), p. 815-825. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.04.005>
- Lee, B. J.; Lee, J. H.; Yoon, H. & Lee, E. 2015. Hydraulic experiments for determination of in-situ hydraulic conductivity of submerged sediments. *Scientific reports*, 5(1): 7917. <https://doi.org/10.1038/srep07917>
- Li, H., Sun, P.; Chen, S.; Xia, Y. & Liu, S. 2010. A falling-head method for measuring intertidal sediment hydraulic conductivity. *Groundwater*, 48(2), p. 206-211. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00638.x>
- Longuet-Higgins, M. S. & Smith, N. D. 1983. Measurement of breaking waves by a surface jump meter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C14), p. 9823-9831. <https://doi.org/10.1029/JC088iC14p09823>
- Ma, Q. & Zhang, Y. 2020. Global research trends and hotspots on submarine groundwater discharge (SGD): A bibliometric analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3): 830. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030830>
- Martínez, M. L.; Silva, R.; López-Portillo, J.; Feagin, R. A. & Martínez, E. 2020. Coastal ecosystems as an ecological membrane. *Journal of Coastal Research*, 95(SI), p. 97-101. <https://doi.org/10.2112/SI95-019.1>
- Mason, T. & Coates, T. T. 2001. Sediment transport processes on mixed beaches: a review for shoreline management. *Journal of Coastal Research*, p.645-657. <https://www.jstor.org/stable/4300216>
- Masselink, G. & Li, L. 2001. The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology*, 176(1-4), p. 139-156. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00161-X)
- Masselink, G. & Puleo, J. A. 2006. Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research*, 26(5), p. 661-680. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.01.015>
- Masselink, G. & Short, A. D. 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of coastal research*, p. 785-800. <https://www.jstor.org/stable/4298129>

- Masselink, G. & Turner, I. L. 2012. Large-scale laboratory investigation into the effect of varying back-barrier lagoon water levels on gravel beach morphology and swash zone sediment transport. *Coastal Engineering*, 63, p. 23-38. [https:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.007](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.007)
- McCall, R. T.; Masselink, G.; Poate, T. G.; Roelvink, J. A. & Almeida, L. P. 2015. Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G. *Coastal Engineering*, 103, p. 52-66. [https:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.06.002)
- McFarland, S., Whitcombe, L., & Collins, M. (1994). Recent shingle beach renourishment schemes in the UK: some preliminary observations. *Ocean & coastal management*, 25(2), 143-149. [https:// doi.org/10.1016/0964-5691\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0964-5691(94)90044-2)
- McLachlan, A. & Turner, I. 1994. The interstitial environment of sandy beaches. *Marine Ecology*, 15(3- 4), p. 177-212. [https:// doi.org/10.1111/j.1439-0485.1994.tb00053.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1994.tb00053.x)
- Missimer, T. M.; Goso, C.; Maliva, R. G. & Hegy, M. C. 2019. Immature beach/dune sands along a passive continental margin: Composition, grain size and hydraulic properties of coastal sands, Parque del Plata and Las Vegas, Uruguay. *The depositional record*, 5(2), p. 322-347. [https:// doi.org/10.1002/dep2.68](https://doi.org/10.1002/dep2.68)
- Nachite, D.; Domínguez, N. D. E.; El M'rini, A. & Anfuso, G. 2020. Environmental Sensitivity Index maps in a high maritime transit area: The Moroccan coast of the Gibraltar Strait study case. *Journal of African Earth Sciences*, 163: 103750. [https:// doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103750](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103750)
- Newman, M. E. 2004. Coauthorship networks and patterns of scientific collaboration. *Proceedings of the national academy of sciences*, 101(suppl_1), p. 5200-5205. [https:// doi.org/10.1073/pnas.0307545100](https://doi.org/10.1073/pnas.0307545100)
- Nielsen, P. 1990. Tidal dynamics of the water table in beaches. *Water resources research*, 26(9), p. 2127-2134. [https:// doi.org/10.1029/WR026i009p02127](https://doi.org/10.1029/WR026i009p02127)
- Nixon, Z.; Michel, J.; Hayes, M. O.; Irvine, G. V. & Short, J. 2013. Geomorphic factors related to the persistence of subsurface oil from the Exxon Valdez oil spill. *Journal of Coastal Research*, (69), p. 115-127. [https:// doi.org/10.2112/SI_69_9](https://doi.org/10.2112/SI_69_9)
- Oliveira, E. B. & Nicolodi, J. L. 2017. Oil permeability variations on lagoon sand beaches in the Patos-Guaíba system in Rio Grande do Sul, Brazil. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), p. 154-163. [https:// doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.020](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.020)
- Oliveira, O. J.; da Silva, F. F.; Juliani, F.; Barbosa, L. C. F. M. & Nunhes, T. V. 2019. Bibliometric method for mapping the state-of-the-art and identifying research gaps and trends in literature: An essential instrument to support the development of scientific projects. *Scientometrics recent advances*. IntechOpen. [https:// doi.org/10.5772/intechopen.85856](https://doi.org/10.5772/intechopen.85856)
- Owens, E. H.; Sergy, G. A.; Guénette, C. C.; Prince, R. C. & Lee, K. 2003. The reduction of stranded oil by in situ shoreline treatment options. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8(3), p. 257-272. [https:// doi.org/10.1016/S1353-2561\(03\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(03)00041-0)
- Packwood, A. R. 1983. The influence of beach porosity on wave uprush and backwash. *Coastal Engineering*, 7(1), p. 29-40. [https:// doi.org/10.1016/0378-3839\(83\)90025-X](https://doi.org/10.1016/0378-3839(83)90025-X)
- Patrus, R., & Silva, V. T. O. 2019. A organização de uma revisão de literatura por meio da Tree of Science (Árvore da Ciência): um exemplo sobre a avaliação da pós-graduação. *Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior (Campinas)*, 24, p. 68-88. [https:// doi.org/10.1590/S1414-40772019000100005](https://doi.org/10.1590/S1414-40772019000100005)
- Pedrozo-Acuna, A.; Simmonds, D. J.; Otta, A. K. & Chadwick, A. J. 2006. On the cross-shore profile change of gravel beaches. *Coastal Engineering*, 53(4), p. 335-347. [https:// doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.019](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.019)

- Pereira, P.S.; & Calliari, L. J. 2005. Permeabilidade das praias oceânicas do Rio Grande do Sul (RS) em relação a eventuais derrames de óleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. Anais... Salvador.
- Postacchini, M.; Russo, A.; Carniel, S. & Brocchini, M. 2016. Assessing the hydro-morphodynamic response of a beach protected by detached, impermeable, submerged breakwaters: a numerical approach. *Journal of Coastal Research*, 32(3), p. 590-602. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00057.1>
- Quick, M. C. 1991. Onshore-offshore sediment transport on beaches. *Coastal Engineering*, 15(4), p. 313-332. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90014-8)
- Reis, A.H. & Gama, C. 2010. Use of sand beds of variable permeability in beach profile engineering. *AIP Conference Proceedings*, 1254(1), p. 231-235. <https://doi.org/10.1063/1.3453816>
- Robinson, C. E.; Xin, P.; Santos, I. R.; Charette, M. A.; Li, L. & Barry, D. A. 2018. Groundwater dynamics in subterranean estuaries of coastal unconfined aquifers: Controls on submarine groundwater discharge and chemical inputs to the ocean. *Advances in Water Resources*, 115, p. 315-331. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.041>
- Robledo, S.; Osorio, G. & López, C. 2014. Networking en pequeña empresa: una revisión bibliográfica utilizando la teoría de grafos. *Revista Vínculos*, 11(2), p. 6-16. <https://doi.org/10.14483/2322939X.9664>
- Rosas, J.; Lopez, O.; Missimer, T. M.; Coulibaly, K. M.; Dehwah, A. H.; Sesler, K.; Lujan, L.R. & Mantilla, D. 2014. Determination of hydraulic conductivity from grain-size distribution for different depositional environments. *Groundwater*, 52(3), p. 399-413. <https://doi.org/10.1111/gwat.12078>
- Sarika, C. & Mohamed, H.K. 2023. Online attention to covid-19 research: an altmetrics analysis. *Kelpro Bulletin*, 27 (1), p. 1-13.
- Schaap, M. G.; Leij, F. J. & Van Genuchten, M. T. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, 251(3-4), p. 163-176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- Sekar, S.; Perumal, M.; Roy, P.D.; Ganapathy, M.; Senapathi, V.; Chung, S.Y.; Elzain, H.E.; Duraisamy, M. & Kamaraj, J. 2022. A review on global status of fresh and saline groundwater discharge into the ocean. *Environmental Monitoring Assessment*, 194: 915. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10566-y>
- Shamsi, A.; Lund, B. D.; & SeyyedHosseini, S. 2022. Sharing of retracted COVID-19 articles: an altimetric study. *Journal of the Medical Library Association*, 110(1): 97. <https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1269>
- She, K.; Horn, D. P. D. P. & Canning, P. 2006. Porosity and hydraulic conductivity of mixed sand-gravel sediment. In: CONFERENCE ON FLOOD AND COASTAL RISK MANAGEMENT, 16, 2006, York. Anais... York, p. 1-16.
- She, K.; Trim, L.; Horn, D.; & Canning, P. 2007. Effects of Permeability on the Performance of Mixed Sand-Gravel Beaches. *Coastal Sediments '07*. Doi:10.1061/40926(239)39
- Shepherd, R. G. 1989. Correlations of permeability and grain size. *Groundwater*, 27(5), p 633-638. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00476.x>
- Slomp, C. P. & Van Cappellen, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impact. *Journal of Hydrology*, 295(1-4), p. 64-86. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.018>

- Solorzano, G. & Plevris, V. 2022. Computational intelligence methods in simulation and modeling of structures: A state-of-the-art review using bibliometric maps. *Frontiers in Built Environment*, 8: 1049616. [https:// doi.org/10.3389/fbuil.2022.1049616](https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1049616)
- Souza, C. R. G. 2009. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 9(1), p. 17-37.
- Sousa, P. H. G. O.; Siegle, E.; & Tessler, M. G. 2011. Environmental and Anthropogenic Indicators for Coastal Risk Assessment at Massaguaçu Beach (SP) Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64, p. 319–323. <http://www.jstor.org/stable/26482185>
- Sousa, P. H. G. O.; Siegle, E.; & Tessler, M. G. 2013. Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). *Ocean & Coastal Management*, 77, p. 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.03.003>
- Steenhauer, K.; Pokrajac, D.; O'Donoghue, T. & Kikkert, G. 2009. Water exchange across the beach face for swash on coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 5, p. 832-844. [https:// doi.org/10.1142/9789814277426_0070](https://doi.org/10.1142/9789814277426_0070)
- Tsurudome, C.; Liang, D.; Shimizu, Y.; Khayyer, A. & Gotoh, H. 2020. Incompressible SPH simulation of solitary wave propagation on permeable beaches. *Journal of Hydrodynamics*, 32, p. 664-671. [https:// doi.org/10.1007/s42241-020-0042-0](https://doi.org/10.1007/s42241-020-0042-0)
- Turner, I. L. & Masselink, G. 1998. Swash infiltration- exfiltration and sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C13), p. 30813-30824. [https:// doi.org/10.1029/98JC02606](https://doi.org/10.1029/98JC02606)
- Turner, I. 1993. Water table outcropping on macro-tidal beaches: a simulation model. *Marine geology*, 115(3-4), p.227-238. [https:// doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90052-W](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90052-W)
- Turner, I. L. 1995. Modelling the time- varying extent of groundwater seepage on tidal beaches. *Earth surface processes and landforms*, 20(9), p. 833-843. [https:// doi.org/10.1002/esp.3290200909](https://doi.org/10.1002/esp.3290200909)
- Turner, I. L.; Coates, B. P. & Acworth, R. I. 1997. Tides, waves and the super-elevation of groundwater at the coast. *Journal of Coastal Research*, 46-60.
- Van Eck, N. & Waltman, L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), p. 523-538. [https:// doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3](https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3).
- Van Eck, N. & Waltman, L. 2023. VOSviewer Manual, version 1.6.19. Centre for Science and Technology Studies, Leiden University. Netherlands. Available at: <https://www.vosviewer.com/getting-started>
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), p. 892-898. [https:// doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x](https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x)
- Van Wellen, E.; Chadwick, A. J. & Mason, T. 2000. A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches. *Coastal Engineering*, 40(3), p. 243-275. [https:// doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00031-4)
- Vandermeulen, J. H. & Singh, J. G. 1994. Arrow oil spill, 1970–90: Persistence of 20-yr weathered bunker C fuel oil. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51(4), p. 845-855. [https:// doi.org/10.1139/f94-083](https://doi.org/10.1139/f94-083)

- Wang, X.; Li, H.; Yang, J.; Wan, L.; Wang, X.; Jiang, X.; & Guo, H. 2014. Measuring in situ vertical hydraulic conductivity in tidal environments. *Advances in water resources*, 70, p. 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.05.004>
- Williams, J.; Masselink, G.; Buscombe, D.; Turner, I.; Matias, A.; Ferreira, O.; Bradbury, A.; Metje, N.; Coates, L.; Chapman, D.; Thompson, C.; Albers, T. & Pan, S. 2009. BARDEX (Barrier Dynamics Experiment): taking the beach into the laboratory. *Journal of Coastal Research*, 158-162. <https://www.jstor.org/stable/25737557>
- Williams, J. J.; Buscombe, D.; Masselink, G.; Turner, I. L. & Swinkels, C. 2012. Barrier dynamics experiment (BARDEX): Aims, design and procedures. *Coastal Engineering*, 63, p. 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.009>
- Zelt, J. A. 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. *Coastal Engineering*, 15(3), p. 205-246. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90003-Y](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90003-Y)
- Zhang, J. Yu, Q.; Zheng, F.; Long, C.; Lu, Z. & Duan, Z. 2015. Comparing keywords plus of WOS and author keywords: A case study of patient adherence research. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 67(4), p. 967–972. <https://doi.org/10.1002/asi.23437>
- Zuluaga, M.; Robledo, S.; Arbelaez-Echeverri, O.; Osorio-Zuluaga, G.A. & Duque-Méndez, N. 2022. Tree of Science - ToS: A web-based tool for scientific literature recommendation. *Search less, research more! Issues in Science and Technology Librarianship*, 100. <https://doi.org/10.29173/istl2696>

3. A MULTI-SCALE ASSESSMENT OF SHORELINE CHANGES AT AN UNDEVELOPED BEACH IN SOUTHERN BRAZIL

Elaine B.de Oliveira & Eduardo G. Barboza

Submetido e publicado no *Journal of South American Earth Science*

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104632>

Abstract:

This research aims to investigate shoreline variability at an undeveloped beach in southern Brazil on interannual and millennial scales. The long-term coastal evolution was investigated by GPR, whereas the interannual scale shoreline changes were analyzed by the Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Simultaneously, a supervised Maximum Likelihood image classification was applied to the dune systems to differentiate vegetation from sand. The results show that the coastline in the Praia das Cabras region is retreating at different scales. The stratigraphic record in GPR shows that the coast has a retrogradational stacking pattern behavior in geological time. At the same time, the results obtained from the digital shoreline analysis revealed that the coast has suffered short-term erosion in the analyzed period, and this is attributed to natural causes. Another point is the higher values of erosion in the extreme parts of the study area, which are related to the presence of washouts. There is also a differentiation in the stage of the dunes and vegetation between the northern and southern parts of the stretch. The northern area is more densely vegetated and has a continuous foredune ridge with incipient dunes forming a ramp, whereas in the southern part, the vegetation is more dispersed, with interrupted dunes forming nebkhas. Between 2019 and 2023 there was a recovery of the dune field, by filling in the blowouts and minimizing the indentations, forming a more homogeneous foredune line.

Keywords: erosion; sandy coastline; barrier evolution; coastal morphology; DSAS; MaxVer

3.1. Introduction

Coastal zones when exposed to a series of dynamic natural processes experience changes, such as erosion and accretion, over long and short periods, as a result of the natural continental adjustment cycle (David et al., 2016; Nicolodi et al., 2021). Erosion is a complex physical process that encompasses a series of natural

and anthropogenic factors, in which the shoreline moves toward the continent due to a net loss of sediments from the system (Galgano Jr., 2007; Bird, 2008; Pilkey et al., 2009; Van Rijn, 2011). Nicolodi et al. (2021) highlight that, although coastal erosion is commonly regarded as a problem, the process occurs unnoticed on coasts that are not inhabited by human communities, where the shoreline displacement is invisible to untrained eyes.

Besides the difficulty in recognizing the indicators of erosion, undeveloped beaches normally suffer from the absence of historical data to support the assessment of coastal displacement. Aerial photos are generally scarce, and the use of satellite imagery is hindered by the lack of markers and infrastructure that could be identified as control points to rectify the images, making them usable.

The fact that natural beaches do not face huge economic losses that attract attention, coupled with the scarcity of data, often leaves them in the background of investigations. However, the analysis of shoreline displacement in these regions can provide crucial information about the natural variability of the coast and dune field, about the impacts of hydrodynamic processes on the beaches, or the impacts of sea level variations on an uninhabited area. This information, meanwhile, can provide support for the creation of strategies that will benefit urbanized areas. Furthermore, the study of shoreline behavior at undeveloped beaches can help to understand the evolution of an area and the relationship between scales, filtering short-term fluctuations (noise) on an overall trend (signal) (Crowell et al., 1993).

Knowledge and quantitative analysis of the shoreline variability over timescales are crucial for the overall understanding of dynamics, and for establishing the processes driving erosion (Oyedotun, 2014; Saad et al., 2018). Besides, coastal monitoring and the assessment of long-term, seasonal, and short-term shoreline changes can assist local authorities in developing sustainable shoreline management plans and making effective decisions for Integrated Coastal Zone Management to guarantee resilience to change pressures (Schwarzer et al., 2003; Esteves et al., 2009; Kankara et al., 2015; Karunarathna et al., 2018).

Despite the importance, studies of shoreline variability at a multi-scale approach are still scarce. Crowell et al. (1993) analyzed the changes in shorelines in the US covering the centennial and decadal scales. Stieve et al. (2002) using diverse case studies showed coastal variability at seasonal, annual, decadal, centennial, and millennial scales. Schwarzer et al. (2003) examined shoreline changes at Pomeranian

Bight, southern Baltic Sea, at decadal, century, and millennial scales. Esteves et al. (2009) analyzed changes in beach volume along Sefton Coast, United Kingdom (UK) at annual and interannual scales. Kankara et al. (2015) investigated shoreline variability at interannual and interdecadal scales along the Andhra Pradesh coast, India. Karunarathna et al. (2018) assessed medium long-term beach change in the UK using Dean's equilibrium profile and the Bruun Rule. Oliveira et al. (2019), Leal et al. (2022; 2023), and Quadrado et al. (2021) analyzed coastal changes in Santa Catarina, Brazil, at interannual, decadal, and millennial scales.

The short and medium-term scales are normally analyzed by the comparison of shoreline positions extracted from aerial photos, satellite imagery, historic maps, and beach surveys. The comparison is mainly made by digital shoreline analysis (DSAS), which is an ArcGIS® extension, used to compute the rate of shoreline change statistics for a time series of shoreline positions (Saad et al., 2018). The millennia scale can be studied by drilling penetration associated with radiocarbon dating or by Ground Penetrating Radar (GPR). GPR is a rapid, no-contact, high-resolution geophysical method, based on electromagnetic wave propagation and reflection, which allows the visualization of depositional geometry and stratigraphy of coastal deposits (Davis and Annan, 1989; Barboza et al., 2009; Biancini da Silva et al., 2014).

In this context, the goal of this research is to investigate the shoreline variability at an undeveloped beach throughout interannual and millennial scales using different technologies in an integrated approach.

3.2. Physical settings

The study area comprises the region called Praia das Cabras (30°06'S/50°11'W), at the boundary between the municipalities of Cidreira and Tramandaí, located on the northern coast of Rio Grande do Sul, Southern Brazil (Figure 3.1). The coast of Rio Grande do Sul is dominated by waves with a significant height of 1.5 m and a microtidal regime, being the tides semidiurnal with a 0.5 m range (Motta, 1969; Calliari et al., 1998). According to Motta et al. (2015), littoral drift is bidirectional with an alternating direction, whereas the reversals are controlled by regional cyclogenesis. A net northward littoral drift in the region was reported by Lima et al. (2001).

The climate is temperate subtropical and the rainfall is relatively well distributed throughout the year, with an average precipitation of 1,300 mm annually (RS, 2020).

The predominant wind is from the northeast, with a seasonality behavior: winds from the north and east quadrants are more frequent and stronger from September to April, whereas winds from the south and west quadrants blow from May to October (Figueiredo and Calliari, 2005).

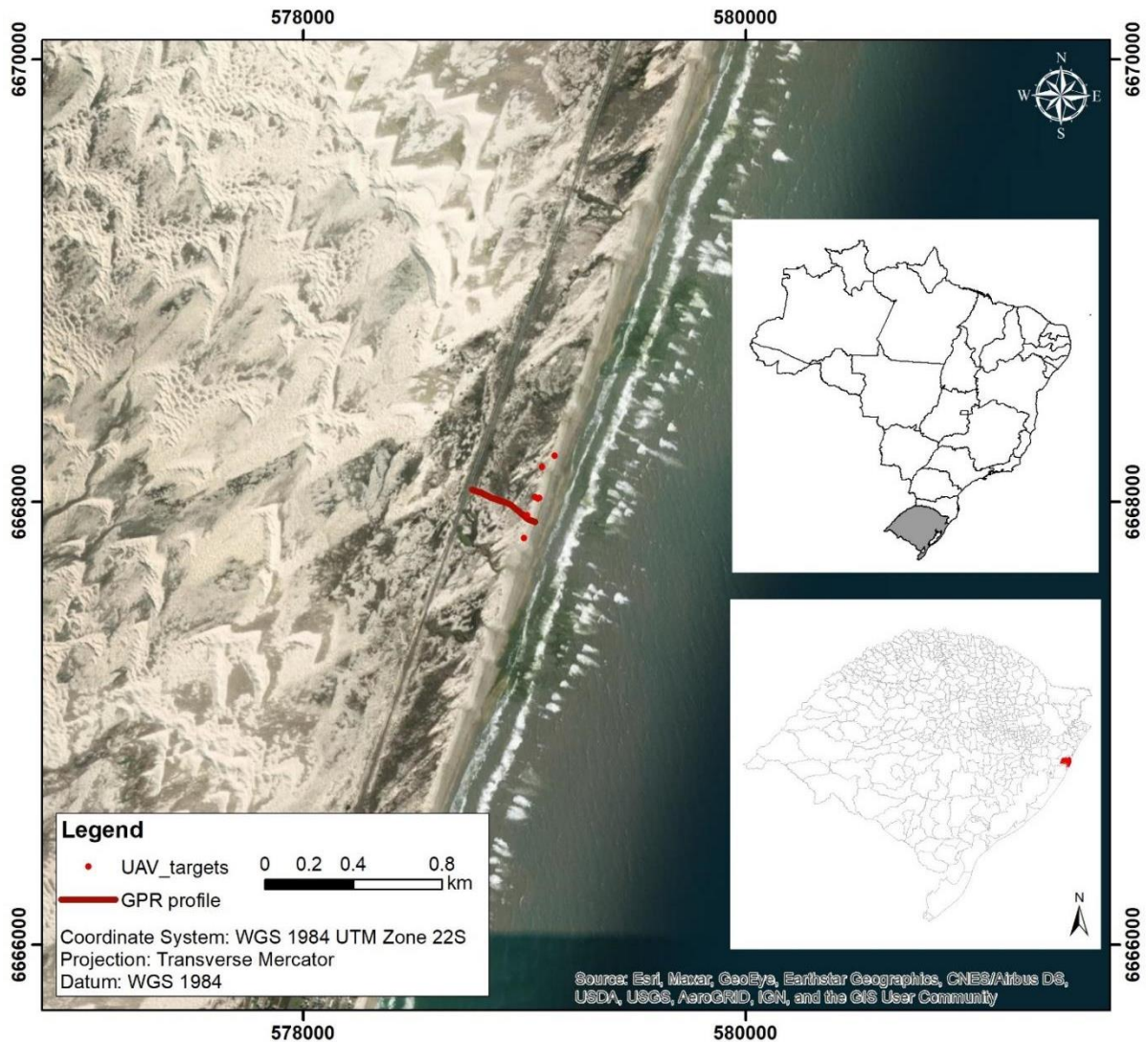


Figure 3.1: Location of the Study Area: Praia das Cabras, Rio Grande do Sul, Brazil. The red line represents the subsurface profile acquired with the GPR, whereas the red points represent the UAV targets used during the UAV acquisition. Imagery source credits: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community. Maps source: IBGE.

The southern coast of Brazil is designated as a "strike-fed" sandy coast due to the great influence of coastal drift on the distribution and deposition of sand along the coast during the coastal plain development (Dominguez, 2009; Dillenburg and Barboza, 2014). The coast developed at the Quaternary through the reworking of alluvial fan deposits during the various transgressive-regressive glacioeustatic cycles, leading to the generation of barrier lagoon-type depositional systems, called, from the

oldest to the most modern, systems I, II, III, and IV (Villwock et al., 1986; Villwock and Tomazelli, 1995; Tomazelli and Villwock, 2000). The shoreline, formed by the Holocene barrier (Barrier IV), is a high-frequency depositional sequence, marked by gentle coastal projections and embayments (Dillenburg et al., 2009; Barboza and Rosa, 2014; Rosa et al., 2017).

The Barrier IV in the region has a retrogradational stacking pattern (Rosa et al., 2016; Watanabe et al., 2023), formed over the last 7 ka BP, at a relative sea level above the current around 1.9 m (Barboza et al., 2021a). The aeolian cover presents a large transgressive dune field, composed mainly of barcanoid chains and, secondarily, of isolated basins and transverse chains (Oliveira and Rosa, 2022). According to Tomazelli et al. (2008), the area is a high-priority point for preservation, since it has active feeding corridors that maintain the dunefield. The section presents well-vegetated frontal dunes (average cover of 65%), with continuous ridges and an average height of 4.18 m (Vianna and Calliari, 2019). Saucer-like blowouts, deflation basins, and washouts are recurring features in the area (Vianna and Calliari, 2015). According to Nowtziki (2019), the dune field vegetation has a higher frequency and cover of *Panicum racemosum*, *Hydrocotyle bonariensis*, *Androtrichum trigynum*, and *Polygala cyparissias*. Moreover, the author affirms that the low and humid areas (lowlands and vegetated dunes) have greater richness and diversity than the dry areas (such as ridges, frontal and embryonic dunes).

3.3. Material & Methods

The displacement of the coastline was evaluated in geological and interannual periods. Various approaches were used, as several methodologies are needed to explore each period. GPR was used to explore long-term coastal evolution, while the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) used UAV data to assess shoreline changes on an interannual scale. The next sections present more details on the successive steps.

3.3.1. Geological Scale:

The long-term coastal evolution was investigated by the stratigraphy of depositional systems. The equipment used for data acquisition was a Cobra Plug-In GPR (Radarteam Sweden AB), with an aerial monostatic antenna Subecho SE-70 with a central frequency of 80 MHz as suggested by Barboza et al. (2014). The geophysical

profile was performed perpendicular to the shoreline (direction NW-SE) using the common offset array. The constant dielectric of 10 was used to convert travel time into depth, representing a velocity of 0.09 m/ns, (Davis and Annan, 1989). This constant was validated using lithological data obtained from SPT drill holes (Watanabe et al., 2023). The GPR system was coupled with a Global Navigation Satellite System (GNSS) Trimble® ProXRT (datum WGS84) for topographic correction.

The processing was performed following the methodology suggested by Barboza et al. (2014). Firstly, Reflex-Win® (Sandmeier Geophysical Research) was used for format conversion. Then, Radan™ (GSSI – Geophysical Survey Systems, Inc.) was used for background removal and to reduce random noises (by frequency filters). Afterward, the data was processed in Prism2® (Radar Systems, Inc.), for the Ormsby bandpass filter and automatic gain control. The topographic correction was executed using Prism2® associated with ArcMap™ and the trace analysis was done according to Leandro et al. (2019). The data was interpreted according to Neal (2004), following the geometry, termination (onlap, downlap, toplap, truncations), and pattern (Mitchum Jr. et al., 1977) of the reflections.

3.3.2. *Interannual Scale:*

3.3.2.1. *Data acquisition*

A DJI Phantom 2 Vision+, DJI Phantom 3 Advanced, and DJI Phantom 4 were used to obtain aerial photographs in three campaigns (2015, 2019, and 2023). First, flight grids were defined in Pix4D acquisition software to cover the study area at 70 m altitude. Operations were manually driven by a remote pilot. Along the area, targets were distributed and georeferenced with a Global Navigation Satellite System (GNSS) Trimble® ProXRT. The altitudes from the targets were used to georeference the results during data processing. Agisoft Photoscan® software was used to generate the digital elevation model (DEM) and the orthophoto (from the UAV pictures). The DEM was built using a Structure from Motion (SfM) approach (Agisoft, 2018).

3.3.2.2. *Data analysis*

The shoreline changes at the interannual scale was analyzed by the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0, following the steps described in Himmelstoss et al. (2018). The orthophotos generated by the drone surveys were used to extract the shorelines, covering 8 years. The use of Google Earth to extract past

shorelines was not possible, since the area lacks markers or infrastructure that allow georeferencing the images.

The shorelines were manually vectorized at ArcMap™ from ArcGIS® software using the dune toe as a proxy. According to Del Río y Gracia (2012), at coastal traits with dunes, the dune toe is commonly used as a shoreline proxy, since it is independent of meteorological circumstances, waves, tides, and beach profile shape. Moreover, according to Liu et al. (2014), for coastal hazard planning, the position of the dune toe is an excellent predictor of the high water mark (shoreline). The Linear Regression Rate (LRR) was selected to calculate the statistics since three shoreline positions were available. LRR is an easy computational method, which is calculated using the least-squares approach, including all the shoreline data available, regardless of trends or accuracy Himmelstoss et al. (2018). At the same time, the End Point Rate (EPR) was selected to calculate the statistics between shorter periods, using only two shoreline positions. EPR is calculated by dividing the distance of shoreline movement by the time between the oldest and the most recent shoreline (Saad et al., 2018). The EPR was calculated for the periods between 2019 and 2015, and between 2023 and 2019. The statistic was calculated within a 95% confidence interval for each transect.

Other analyses were done simultaneously. Firstly, the DEMs, available from the UAV surveys, were compared and used to extract the dune height to understand the volumetric change. The comparison was done using Raster Calculator in ArcGIS® software to generate the DEM of Difference (DoD). DoDs were computed by subtracting the DEM that was surveyed later from the DEM that was surveyed earlier (Pollard et al., 2019). According to Williams (2012), DoDs can be used to evaluate the predictions of numerical morphodynamics models and provide insight into the connection between process and form. The error was accessed by calculating the Minimum Level of Detection, which is estimated from the root sum square of individual errors in each DEM (Williams, 2012). Secondly, a supervised image classification by the Maximum Likelihood (MaxVer) was applied in the dune systems to differentiate the vegetation from the sand, as performed by Vianna et al. (2020) and Saad et al. (2022). The accuracy of the classification was calculated using the Kappa coefficient (Cohen, 1960), and the land cover change of the overlapped dune area was calculated using the command Calculate geometry in ArcGIS® software.

3.4. Results & Discussion

3.4.1. Surface data products:

The products (digital elevation models and orthophotos) generated with the data acquired by the unmanned aerial vehicle (UAV) survey are shown below. The orthophotos (Figure 3.2), especially from 2019, show a differentiation in the dune stages and vegetation between the northern and the southern part of the stretch. The northern area is more densely vegetated and has a continuous foredune ridge with incipient dunes forming a ramp, whereas, in the southern part the vegetation is more scattered, with disrupted foredunes forming nebkhas. According to Hesp (2002), ramps can form where plants grow at the base of a foredune scarp, which gradually accretes. Nebkas, on the other hand, are formed on the entrance of blowouts, which are depressions formed by wind erosion on a preexisting sand deposit (Hesp, 2002).

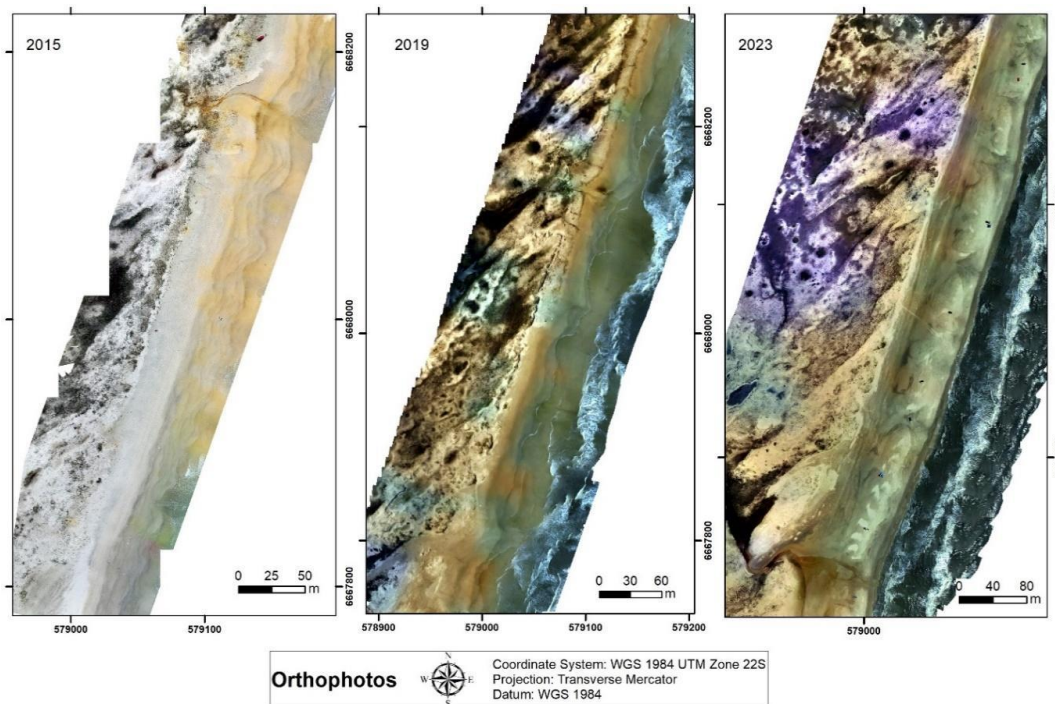


Figure 3.2: Orthophotos generated with the UAV data. The three maps show a distinction in the dune stages between the northern and southern parts: whereas the foredune ridge is uninterrupted in the north, it is broken up in the south

A closer look between the 2019 and 2023 orthophotos (Figure 3.3) it is possible to see the evolution of the dunefields over this period. Firstly, there was a filling of the blowouts, which now look shallower. The indentations, especially in the southern section, were also minimized and filled in, forming a more homogenous foredune line. Moreover, the incipient dunes have been different over the years. In 2019, the dunes

formed a wider and vegetated ramp, whereas, in 2023, they are narrower and practically bare.

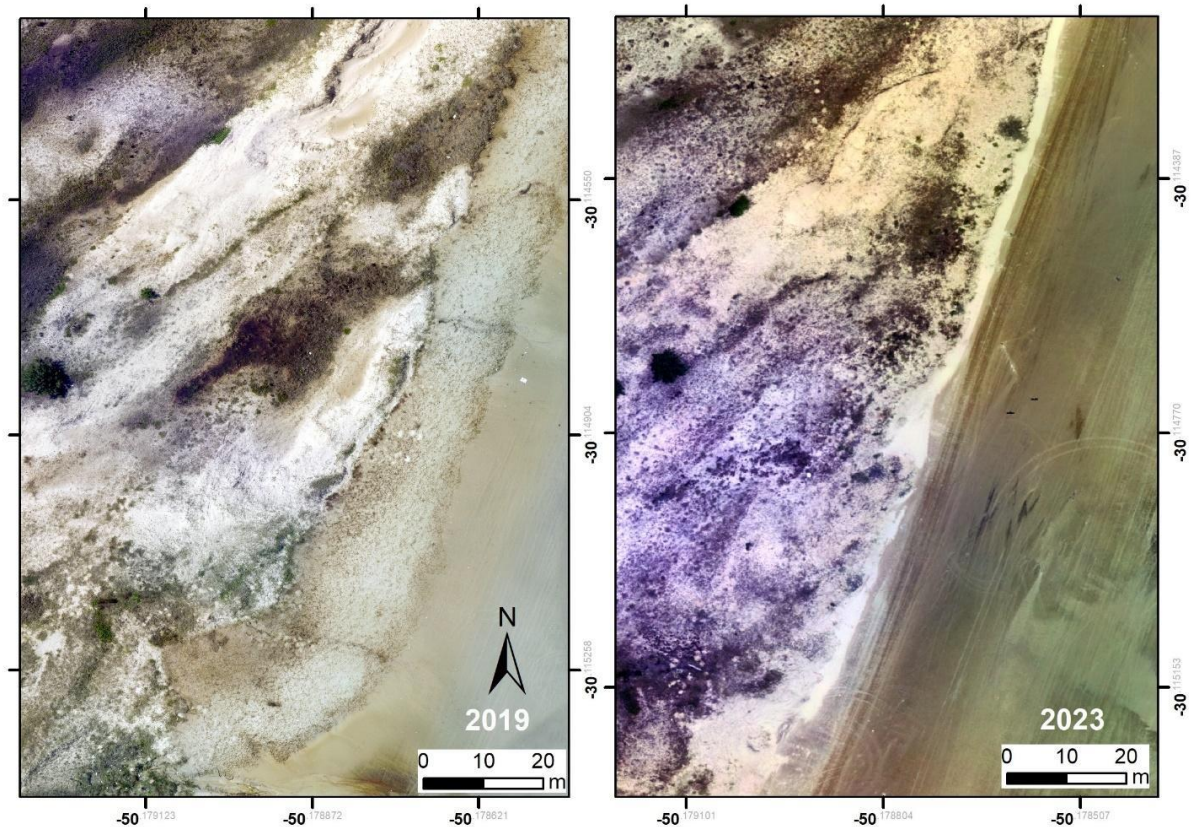


Figure 3.3: A closer look at the dunes from 2019 and 2023. The photos reveal that the blowouts are shallower in 2023 and that the incipient dunes that formed a wide, vegetated ramp in 2019 are narrower and nearly bare in 2023.

As expected, the DEM for all years (Figure 3.4) shows higher altitude values in the crest of the dunes. The morphology of the dunefield, with deflation plans (low area surrounded by higher altitude values) and linear sand trails (oblique red trail), is also evident in the model. The volumetric change over the years, displayed by the DoD (Figure 3.5), shows that the entire area suffered a reduction of elevation values from 2015 to 2019, with a mean value of -2.597 m and a standard deviation of 0.356 m. Greater changes can be seen at the crest of the foredunes. From 2019 to 2023, the volume of sediments recovered, and there was accretion in almost the entire study area. The mean change value was 2.2240 m, with a standard deviation of 0.3363 m. The results of the Minimum Level of Detection show a DoS error of 0.2379 m for the period between 2019 and 2015, and 0.4983 m from 2019 to 2023. The mean dune height in the area remained relatively stable, with values of 3.15 m (2015), 3.2 m (2019), and 3.37 m in 2023.

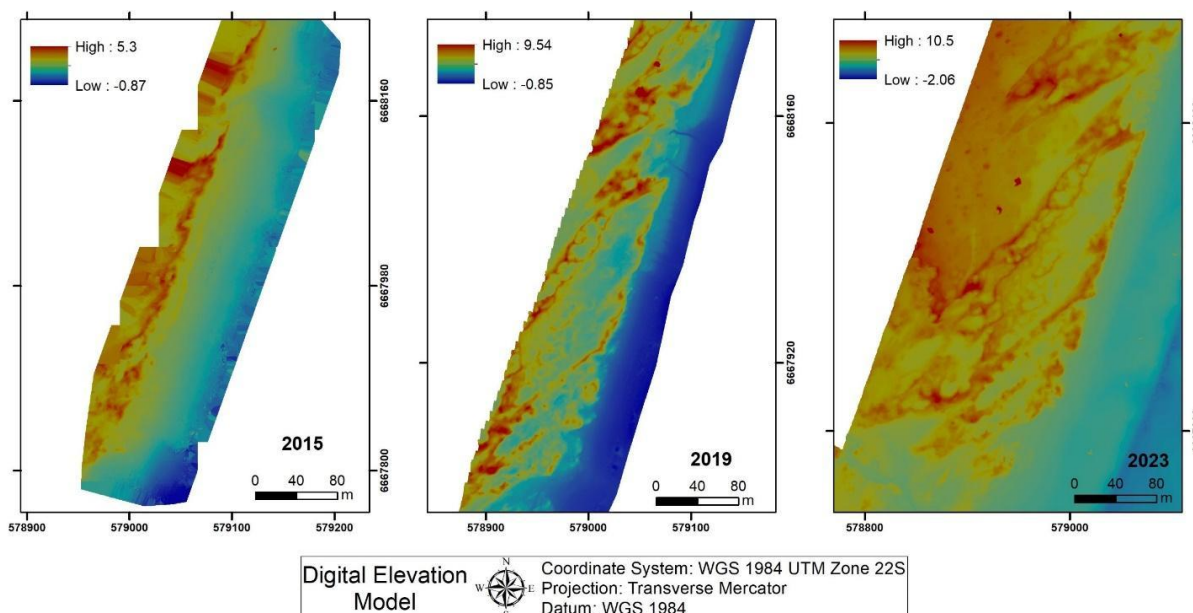


Figure 3.4: Digital Elevation Model for 2015, 2019, and 2023 surveys. The maps illustrate the greater altitude values at the dunes' crests and along the linear sand trails. The reduction in altitude induced by a washout in the southern region is visible in 2023.

The use of geotechnologies, such as drones and airborne, as a tool for coastal monitoring and management, has been investigated intensively in the last years (Casella et al. 2016; Scarelli et al., 2016, 2017; Addo et al., 2018; Albuquerque et al. 2018; Lieveld et al., 2018; Oliveira et al., 2020). The products generated (DEM and orthophotos) can be used, for example, to detect changes in the sediment movement and the removal of vegetation, to determine the position of the shoreline through time, to map flooding risk, to understand the evolution of dunes, and to define the impacts of storms. According to Casella et al. (2016), the use of UAVs as a monitoring tool has many advantages, including cost-effectiveness and higher efficiency (because they are faster than traditional methods and cover larger areas). The use of drones is also a solution for the monitoring of natural and unhabitated regions. These areas are harder to monitor with satellite data and historic aerial photos due to the lack of structures that could be identified as control points to georeference the images. Continuous monitoring with UAVs contributes to the development of a database to solve this gap.

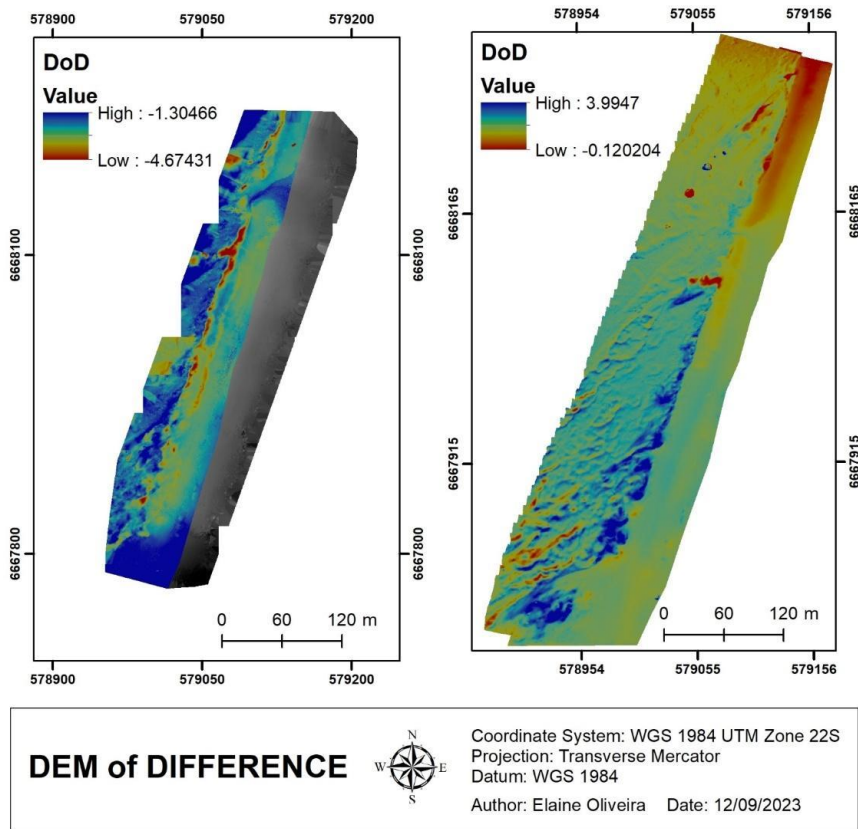


Figure 3.5: DEM of Difference (DoD) showing volumetric change between the periods. On the left is a comparison between 2019 and 2015. On the right is the period between 2023 and 2019.

3.4.2. Vegetation cover:

The result of the automatic classification with the vegetation cover and the sand area can be seen in Figure 3.6. The three maps showed very good accuracy, with a Kappa coefficient of 1 for 2015 and 2023, and 0.99 for 2019. The accuracy assessment, with the agreement between the classes, can be seen in Table 3.1. In addition, the intersecting area was compared to detect changes in the vegetation cover. The vegetated area had an overall increase of 9% from 2015 to 2019 (16.5% of the 2015 vegetation was removed and classified as sand in 2019, whereas 25.7% of the area categorized as sand in 2015 was classified as vegetation in 2019). Between 2019 to 2023, the vegetated area had an overall decrease of 1.5% (16.1% of the 2019 vegetation was removed and classified as sand in 2023, whereas 14.6% of the area categorized as sand in 2019 was classified as vegetation in 2023).

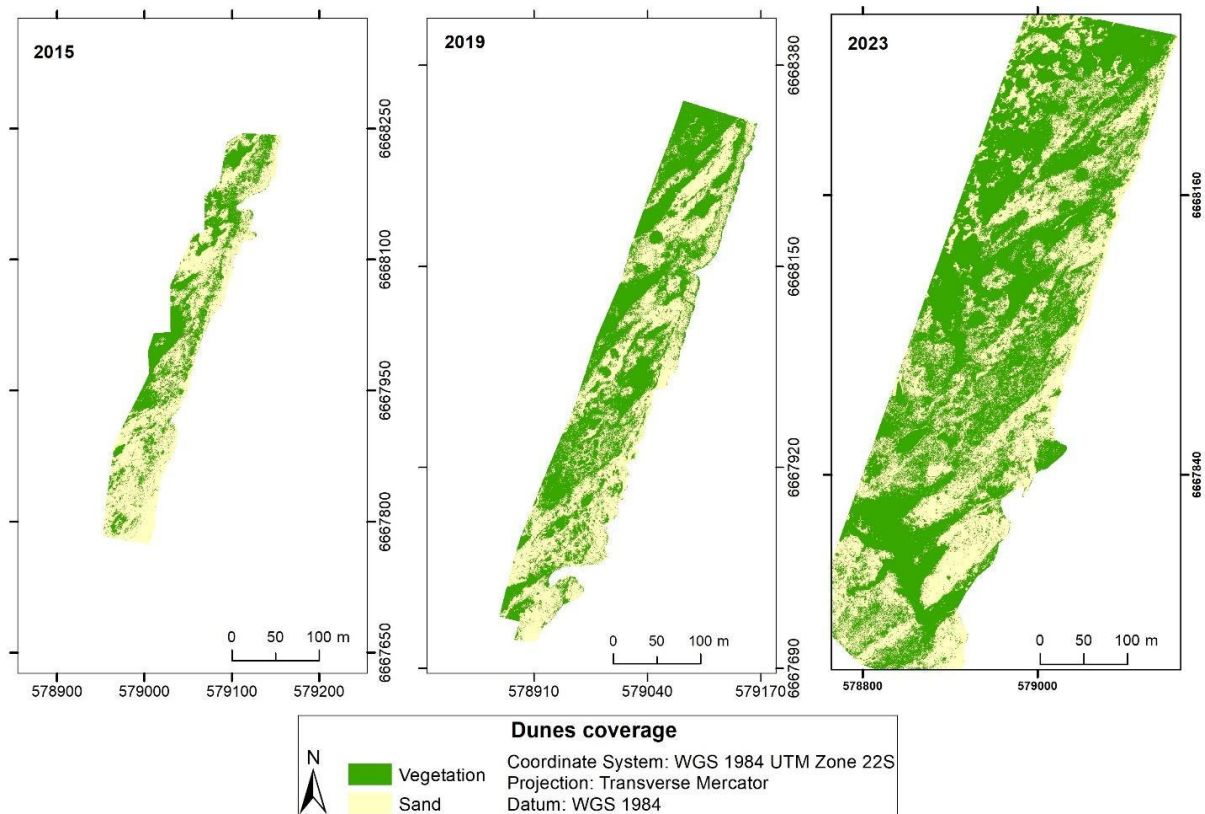


Figure 3.6: Results of automatic classification for vegetation cover on the dunes. Between 2015 and 2019, the vegetated area got higher, whereas from 2019 and 2023 it declined by 1.5%

Table 3.1: Accuracy assessment for the automatic classification

2015	Sand	Veget.	2019	Sand	Veget.	2023	Sand	Veget.
Sand	72	0	Sand	144	0	Sand	40	0
Veget.	0	95	Veget.	1	94	Veget.	0	75
<i>Kappa</i>	1.00		<i>Kappa</i>	0.9912		<i>Kappa</i>	1.00	
<i>Overall</i>	1.00		<i>Overall</i>	0.9958		<i>Overall</i>	1.00	

The image (Figure 3.6) shows the presence of linear sand trails formed by the wind action and supports the differentiation in the vegetation cover between the northern (more densely vegetated) and southern part (scattered), in both years. The scattered vegetation in the end part is associated with the presence of a washout that is recurrent over time. Washouts are small creeks that drain accumulated rainwater from the back barrier and play an important role in sediment exchange (Figueiredo and Calliari, 2005; Martinho et al., 2010; Serpa et al. 2011). According to Vianna and Calliari (2019), washouts are responsible for the discontinuity of the foredune ridge since they create erosive scarps in the dunes, in a continuous erosive process that does not allow the vegetation to recover it.

3.4.3. Geological Scale:

The GPR subsurface profile 320 m long, acquired at the study area (Fig. 3.1) is exhibited in Figure 3.7. The interpretation of data allowed the identification of four radarfacies (Rdf1, Rdf2, Rdf3, Rdf4), correlated with three stratigraphic units (I, II, and III). The radarfacies description is shown in Table 3.2.

Unit I, associated with the radarfacies 4, is characterized by reflections with high amplitude signals and hyperboles and is interpreted as the Pleistocene substrate. Unit II, corresponding to lagoonal deposits, can be divided into two subunits: lagoon bottom (radarfacies 3) and lagoon margin (radarfacies 2). The lagoon bottom presents onlap terminations, whereas lagoon margins (beaches and deltas) have downlap termination to landward with a sigmoid-oblique form. The Unit at the top of the register (III), associated with aeolian deposits and transgressive sand sheets (radarfacies 1), shows high amplitude signals, and continuous and parallel reflections.

According to Dillenburg et al. (2009) and Lima et al. (2013), Pleistocene deposits are formed by fine to very fine pale green quartz sands, moderately sorted. Lagoonal sediments are formed by gray to very pale green fine quartz sands, moderately sorted, interlayered with dark gray organic muds with a high content of shell debris. Aeolian deposits are formed by well-sorted, pale yellow fine quartz sands, with very low compaction.

The distribution of deposits combined with the direction of reflections (dipping landward) in the GPR section indicates that the area has a retrogradational stacking pattern behavior. Transgressive sectors are marked, in the stratigraphic sequence, by aeolian deposits covering lagoon deposits (Dillenburg and Barboza, 2014; Dillenburg et al., 2004; Barboza et al., 2011, 2021b; Lima et al., 2013; Rosa et al., 2016; Bitencourt et al., 2020; Quadrado et al., 2021; Watanabe et al., 2023). The transport of sand into the lagoon is done by two main mechanisms: the migration of dunes promoted by the action of the wind or by ephemeral washouts building deltas in the lagoonal margin (Martinho et al., 2010; Barboza et al., 2011; Tomazelli et al., 2013; Lima et al., 2013; Barboza and Rosa, 2014; Rosa et al., 2016).

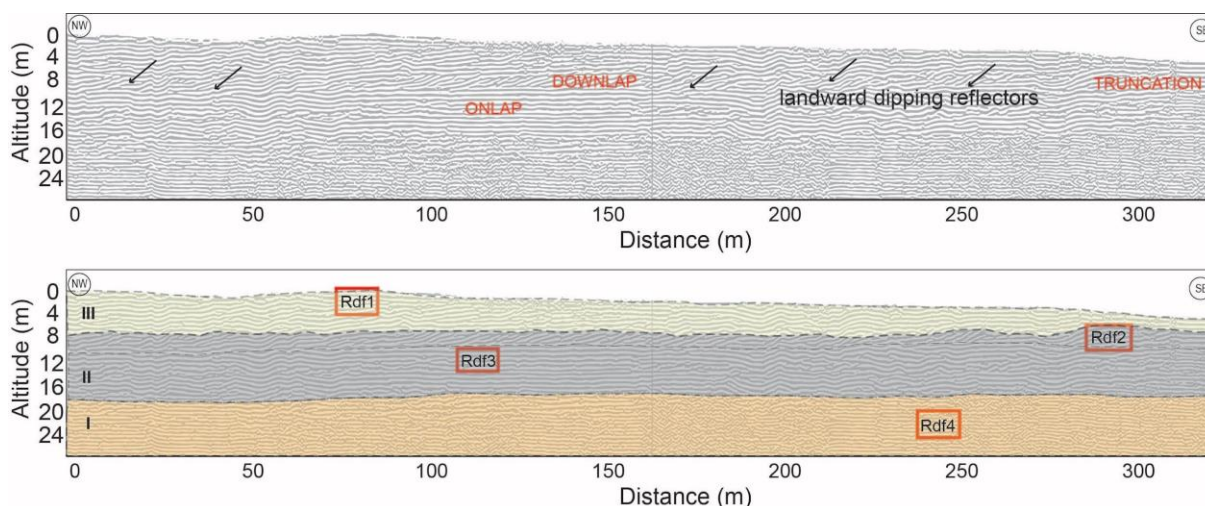


Figure 3.7: GPR profile section. On the top is shown the direction and pattern of reflections. At the bottom, are the units and radarfacies.

Table 3.2: Description of radarfacies

Radarfacies	Pattern	Description	Interpretation
<i>Rdf1</i>		Shape: planar Dip: low angle to West Relationship: subparallel with oblique truncation Continuity: relatively continuous	Aeolian deposits
<i>Rdf2</i>		Shape: sigmoidal Dip: unidirectional, variable Relationship: oblique tangential Continuity: continuous	Lagoon margin deposit
<i>Rdf3</i>		Shape: planar Dip: low angle to West Relationship: subparallel with oblique truncation Continuity: relatively continuous	Lagoon bottom deposit
<i>Rdf4</i>		Signal attenuation Presence of hyperboles	Pleistocene deposit

3.4.4. Interannual Scale:

The results, obtained with the DSAS analysis, show a process of coastal recession in 100% of the area, whereas the percent of transects that have statistically significant erosion is 0.75%. The Linear Regression Rate (LRR) has an average of -2.01 m/year with an uncertainty of 4.03 m/year. The maximum value erosion is -5.07 m in transect 271. The shoreline change rates (LRR) for each transect are displayed in Figure 3.8. The End Point Rate (EPR) showed erosion in 100% of the area for the period between 2019 and 2015 with an average of -4.11 m/year and an uncertainty of 0.33 m. From 2019 to 2023, on the other hand, only 28% of transects presented erosional behavior, with an average of -0.73 m/y. The rest of them showed accretion, with an average of 2.4 m/y. One of the explanations for the accretion is the recovery of the dunefield that was mentioned in Figure 3.3. As we saw before, there was a filling

and minimization of indentations and blowouts, forming a more homogenous foredune line and, consequently, showing an accretion pattern. The DoD also shows a gain in volume in this period. The accretion, however, was not enough to fully recover from the severe erosion suffered in previous years. Therefore, although there has been an accretion in the last three years (2019-2023), overall, the coast has eroded.

It is important to mention that, despite the facility, the estimative of shoreline change using DSAS should be used carefully. According to Albuquerque et al. (2013), DSAS is susceptible to mistakes and can overestimate the erosion rates since it takes into account a punctual measure of an area, which could represent coastal variability, rather than an erosive process. Moreover, Oyedotun (2014) affirms that the accuracy of the results is dependent on the accuracy of the input data.

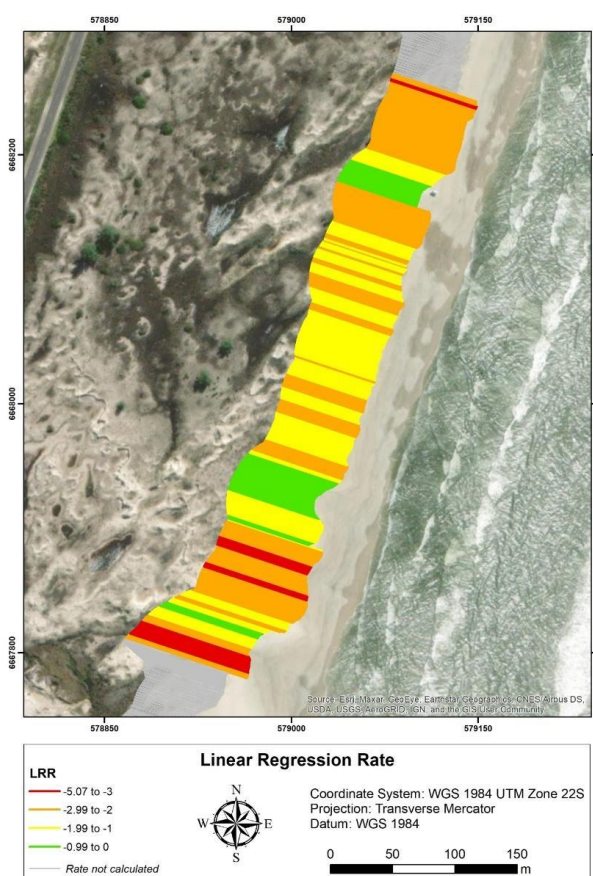


Figure 3.8: Shoreline change rates (from 2015 to 2023), in meters per year, using the Linear Regression Rate and the dune toe proxy. The color scheme represents the degree of erosion, with hot tones indicating severe erosion.

By the map (Figure 3.8), it is noticeable that the extreme parts of the segment had higher erosion values. The presence of washouts once more helps to explain the higher rates of erosion in these sectors. According to Vianna et al. (2020), areas with lower altitudes and next to inlets are more susceptible to erosion. Washouts are included in the characteristics that enhance susceptibility once they lower the elevation

in the channel, favoring the exchange of water and sediments between the back barrier and the ocean. Furthermore, by disrupting the foredunes, they remove the vegetation, decreasing the capacity of the dunes to resist extreme events. The relationship between erosion and vegetation is evident by comparing the LRR rates with the results of the automatic classification, where the scattered vegetation areas appear to have higher landward movement.

The high erosion in the study area is also evident in the outcrop of lagoonal mud deposits in the foreshore zone (Figure 3.9). According to Dillenburg and Hesp (2009), the outcrop of lagoonal/estuary sediments at the foreshore zone (close to the present sea level) is characteristic of a negative sediment supply. Barboza and Rosa (2014) affirm that mud and peat are exposed during high-energy events, like recurrent storm surges. Besides, the presence of lagoonal deposits in the subsurface reduces the permeability and promotes the presence of washouts (Figueiredo and Calliari, 2005), which can intensify erosion on short scales.



Figure 3.9: Picture of Praia das Cabras showing the outcrop of lagoonal mud at the beach. Credit: Eduardo Barboza.

The erosion behavior of Praia das Cabras documented in this paper is in accordance with the studies of Toldo Jr. et al. (2006a) and Esteves et al (2006), who, analyzing the shoreline position using GPS, state that there was a retreat of the shoreline on this sector in the period of 1975 to 2002. The results, however, are disagreeing with more recent works. Casagrande et al. (2018), studying the urbanized area of Cidreira (slightly south of the study area) between the years 2004 to 2015, identified a stable accretion behavior due to the variations in the wind regime. Nicolodi et al. (2021), using results of previous studies associated with long-term coastline projections, identified a stable behavior for the sector where the study area is located.

The discrepancy shows the need to investigate shoreline behavior with higher spatial and temporal resolution.

Since Praia das Cabras is an undeveloped area, it is safe to infer that all of the causes of erosion are connected to natural events. Natural causes of erosion on the Rio Grande do Sul coastline on the short scale are associated with storm surges, the concentration of wave energy due to bathymetric features, and variations in the longshore sediment transport (Esteves et al., 2002; Dillenburg et al., 2004; Nicolodi et al., 2021). Considering there is no refraction and convergence of energy in this sector of the coast (Speranski and Calliari, 2006), erosion is attributed to longshore drift and extreme events.

The littoral drift along the RS coast has a resultant direction to the northeast and calculated transport rate values ranging from 1 to 3 million m³ (Lima et al., 2001; Martinho et al., 2009; Motta et al., 2015). Due to the lack of inlets or anthropic structures in the study area, it is possible to affirm that there are no interruptions of the longshore transport. However, the volume of sediment transported alongshore is influenced by the geomorphology of the coastline: the transport increases in the coastal projections and decreases in the embayments (Martinho et al., 2009; Barboza and Rosa, 2014). The study area is at the transition between the coast projection and embayment, where there is a change in beach alignment. According to Toldo Jr. et al. (2006b), in these sectors there is a reduction in transport flux, causing a bottleneck effect in the shoreline drift and consequent deposition of sediments, which becomes an important source of sand for the development of coastal dunefields. The net landward transport of sand by the wind to form the dunefields is regarded as one of the area's sediment sinks.

Regarding storm surges, several authors have studied the occurrence and impacts of these events on the RS shoreline (Barletta and Calliari, 2002; Parise et al., 2009; Machado et al. 2011; Machado and Calliari, 2016; Oliveira et al., 2017; 2019; Albuquerque et al., 2018; Vianna et al., 2020). An extratropical cyclone occurred in 2016, e.g., was responsible for a shoreline retreat of 5.9 m in Hermenegildo (Albuquerque et al., 2018), 5 m in Cidreira (Vianna et al., 2020), and 13.74 m in Mostardas (Oliveira et al., 2019). The 2016 cyclone can even be considered one of, if not the most important, factors responsible for the severe erosion identified between 2015 and 2019 at Praia das Cabras. According to Machado and Calliari (2016), the most severe effects of extreme events recorded on the RS coast resulted from a storm surge of 1.88 m and a wind speed of 26.21 m/s.

Machado et al. (2011), after analyzing 40 events with significant wave heights higher than 6 m between 1979 and 2008, identified four synoptic patterns (Tab. 3.3) capable of generating extreme events on the RS coast. The numbers suggest that more than one powerful event by year can be expected, which can intensify the effects on the coast since successive storms can have a dramatic impact as the second and subsequent events occur on a beach that already has an eroded profile (Bird, 2008; Vousdoukas et al., 2012).

Table 3.3: Synoptic patterns capable of generating extreme events on the RS coast. Source: Machado et al. (2011).

Pattern	Description
I	Cyclogenesis in the southern Argentinean coast with a displacement to the east and a trajectory between 47.5°S and 57.5°S
II	Cyclogenesis in the southern Uruguayan coast with a displacement to the east and a trajectory between 28°S and 43°S
III	Cyclogenesis in the southern Uruguayan coast with a displacement to the southeast and a trajectory between 32°S and 57.5°S
IV	High-pressure center generating an easterly wind

As a final point, the results obtained demonstrate that there is an agreement in the shoreline displacement (landward) between the geological and interannual scales. According to Dougherty et al. (2019), the short-term products provide an understanding of coastal evolution within the context of the regional setting, while the integration of surface (aerial imagery) and subsurface (GPR) is useful to comprehend the transitions from uniform to complex evolution by constructing paleoenvironmental records and by identifying significant shifts in the stratigraphy and morphology. Nevertheless, Quadrado et al. (2021) highlight that since the geological evolution of a system is a total of changing phases throughout centuries and millennia, short- and medium-term shorelines do not necessarily need to match with the long-term trend of the barrier to verify its overall behavior.

3.5. Conclusions

The assessment of shoreline variations at Praia das Cabras indicates that the coast is retreating at different scales. The stratigraphic record on the GPR shows that the coast has a retrogradacional stacking pattern behavior in this sector at the geological time. At the same time, the results obtained with the digital shoreline analysis revealed that the coast has suffered short-term erosion in the period analyzed. The erosion is attributed to natural causes, storm surges at the forefront of possibilities.

In the future, investigations of longshore transport are essential to understand if the eroded sediment is being destined for longshore drift, offshore, or to construct dunefields inland.

The combination of subsurface and surface data showed that the characteristics of retrograding barriers have an impact on the short-term shoreline changes in the study area. Transgressive coasts have the presence of lagoonal mud, a very compact layer that can influence the shoreline on a short scale by decreasing the permeability of the soil, whereas low permeability can increase the quantity and size of washouts. Since washouts remove the vegetation and provoke the discontinuity of the foredune ridges, they are responsible for decreasing the coast's capacity to resist storms, and, consequently, turn the areas under their influence more susceptible to erosion. This link between permeability, drainage, and erosion is not completely clear and needs to be pursued and better comprehended to identify its existence and magnitude. The efforts do result in the integration of disciplines that will help to solve the missing link between the land and the ocean.

Natural areas are harder to monitor due to the lack of fixed points that can be recognized in historical aerial photos or satellite images to georeference the image, a mandatory step in any GIS (geographic information system) analysis. The use of UAV products will help to fill this gap, providing a better understanding of the natural fluctuations of the shoreline in remote areas. Besides, the integration of different techniques (e.g. drone, DSAS, and automatic classification) to evaluate the development of the coast has proved useful in analyzing different aspects that are correlated with the loss of sediments, like vegetation cover change and washout presence. Finally, the methods used have a strong application for Integrated Coastal Management, as they can be used to define setback boundaries, create spatial planning instruments, select coastal protection strategies, and validate erosion models.

Acknowledgments: The authors acknowledge Felipe Caron, Maria Luiza Correa da Camara Rosa, CECO, and UFRGS.

Funding: This study was supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Brazil.

References

- AGISOFT. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition*. Version 1.4, Agisoft LLC. Available at: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- ADDO, K.A.; JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; CODJOE, S.N.A.; MARTEY, F. (2018). Drone as a tool for coastal flood monitoring in the Volta Delta, Ghana. *Geoenvironmental Disasters*, v.5, n.17, p. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40677-018-0108-2>
- ALBUQUERQUE, M. D. G., LEAL ALVES, D. C., ESPINOZA, J. M. D. A., OLIVEIRA, U. R., & SIMÕES, R. S. (2018). Determining shoreline response to meteo-oceanographic events using remote sensing and unmanned aerial vehicle (UAV): a case study in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v.85, p. 766-770. <https://doi.org/10.2112/SI85-154.1>
- ALBUQUERQUE, M., ESPINOZA, J., TEIXEIRA, P., DE OLIVEIRA, A., CORRÊA, I., & CALLIARI, L. (2013). Erosion or coastal variability: An evaluation of the DSAS and the change polygon methods for the determination of erosive processes on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, v. 65, p. 1710-1714. <https://doi.org/10.2112/SI65-289.1>
- BARBOZA, E.G.; ROSA, M. L. C. C. & CARON, F. (2014). Metodologia de aquisição e processamento em dados de Georradar (GPR) nos depósitos quaternários da porção emersa da Bacia de Pelotas. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2014, Porto Alegre, *Resumos Expandidos...* Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geofísica, v.1, p.1-6. <https://doi.org/10.13140/2.1.3369.5047>
- BARBOZA, E.G. & ROSA, M.L.C.C. (2014). Indicadores geológicos e geomorfológicos de setores em erosão na costa do Rio Grande do Sul. In: GOSO, C. *Nuevas miradas a la Problemática de los ambientes costeros*. DIRAC Facultad de Ciencias, v. 1, p. 83-98. <https://doi.org/10.13140/2.1.4628.9602>
- BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; HESP, P.AL; DILLENBURG, S.R.; TOMAZELLI, L.J.; AYUP-ZOUAIN, R.N. (2011). Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) – a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 64, p. 646-650. <https://www.jstor.org/stable/26482251>
- BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; RITTER, M. N.; ANGULO, R. J.; BIANCINI DA SILVA, A.; ROSA, M. L. C. C.; CARON, F.; SOUZA, M. C. (2021a). Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. *Geosciences (Switzerland)*, v. 11, n. 8, 326. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080326>.
- BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R.; LOPES, R. P.; ROSA, M. L. C. C.; CARON, F.; ABREU, V. S.; MANZOLLI, R. P.; NUNES, J. C. R.; WESCHENFELDER, J.; TOMAZELLI, L. J. (2021b) Geomorphological and Stratigraphic Evolution of a Fluvial Incision in the Coastal Plain and Inner Continental Shelf in Southern Brazil. *Marine Geology*, v. 437, 106514. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106514>.
- BARLETTA, R. D. C., & CALLIARI, L. J. (2001). Determinação da intensidade das tempestades que atuam no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v.28, n.2, p. 117-124. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.20276>
- BIANCINI DA SILVA, A; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; DILLENBURG, S.R. (2014). Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. SI 70, p. 205-210. <https://doi.org/10.2112/SI70-035.1>
- BIRD, E.C.F. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons Ltda, Second edition, p. 436.
- BITENCOURT, V. J.B., DILLENBURG, S., BARBOZA, E.G., ROSA, M. L., & MANZOLLI, R. P. (2020). Padrões de empilhamento estratigráfico e seus reflexos na morfologia da barreira

- costeira holocênica no litoral médio do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n.3, p. 529-548. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1789>
- CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M & KLEIN, A.H.F. (1998). Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in Southern Brazil – Rio Grande to Chuí. *Academia Brasileira de Ciências*, p.231-247.
- CASAGRANDE, A. I.; AGUIAR, D.; NICOLODI, J. L. & DAMIÃO, A. A. (2018). Tendências de variação na linha de costa de Cidreira (RS) e suas relações com parâmetros oceanográficos e meteorológicos. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*, n. 31, p. 35-62.
- CASELLA, E.; ROVERE, A.; PEDRONCINI, A.; STARK, C.P.; CASELLA, M.; FERRARI, M. & FIRPO, M. (2016). Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Mar Lett*, v. 36, p. 151-163. DOI 10.1007/s00367-016-0435-9
- COHEN, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, v. 20, n.1, p. 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- CROWELL, M., LEATHERMAN, S. P., & BUCKLEY, M. K. (1993). Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, v. 61, n. 2, p. 13-20.
- DAVID, T.I.; MUKESH, M.V.; KUMARAVEL, S. & SABEEN, H.M. (2016). Long-and short-term variations in shore morphology of Van Island in Gulf of Mannar using remote sensing images and DSAS analysis. *Arabian J. Geoscience*, v.9, n. 756, p. 1-7. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2772-4>
- DAVIS, J. L., & ANNAN, A. P. (1989). Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, v. 37, n. 5, p. 531-551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- DEL RÍO, L., & GRACIA, F. J. (2013). Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural hazards*, v. 65, pp. 2385-2397. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0407-y>
- DILLENBURG, S.R. & BARBOZA, E.G. (2014). The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. In: MARTINI, I.P. & WANLESS, H.R. *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. Geological Society, London, Special Publications, v. 388, p. 333-352. <https://doi.org/10.1144/SP388.16>
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; TOMAZELLI, L.J.; HESP, P.A.; CLEROT, L.C.P. & AYUP-ZOUAIN, R.N. (2009). The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A, *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Lecture notes in Earth Sciences, v. 107. Springer, Berlin, p. 53-91. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_3
- DILLENBURG, S.R.; ESTEVES, L.S. & TOMAZELLI, L.J. (2004). A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 76, n. 3, p. 611-623. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652004000300014>
- DILLENBURG, S.R. & HESP, P.A. (2009). Coastal barriers – an introduction. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A, (Eds.), *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Lecture notes in Earth Sciences, v. 107. Springer, Berlin, p. 1-15. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_1
- DOMINGUEZ, J.M.L. (2009). The coastal zone of Brazil. In: DILLENBURG, S.R. & HESP, P.A. (Eds.), *Geology and geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer, Berlin, v.107, p.17-51.

- DOUGHERTY, A. J., CHOI, J. H., TURNEY, C. S., & DOSSETO, A. (2019). Optimizing the utility of combined GPR, OSL, and Lidar (GOaL) to extract paleoenvironmental records and decipher shoreline evolution. *Climate of the Past*, v. 15, n. 1, 389-404. <https://doi.org/10.5194/cp-15-389-2019>
- ESTEVEES, L. S., DILLENBURG, S. R., & TOLDO JR., E. E. (2006). Alongshore patterns of shoreline movements in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 215-219.
- ESTEVEES, L.S.; TOLDO JR., E.E.; DILLENBURG, S.R. & TOMAZELLI, L.J. (2002). Long-and short-term coastal erosion in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 36, p. 273-282. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.273>
- ESTEVEES, L.S.; WILLIAMS, J.J.; NOCK, A. & LYMBERG, G. (2009). Quantifying shoreline changes along the Sefton Coast (UK) and the implications for research-informed coastal management. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56, p. 602-606. <https://www.jstor.org/stable/25737648>
- FIGUEIREDO, S.A. & CALLIARI, L.J. (2005). Sangradouros: Distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. *Gravel*, v. 3, p. 47-57.
- GALGANO JR., F. A. (2007). Types and causes of beach erosion anomaly areas in the US East Coast barrier island system: Stabilized tidal inlets. *Middle States Geographer*, v. 40, p. 158-170.
- HESP, P. (2002). Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology, and dynamics. *Geomorphology*, v. 48, n. 1-3, p. 245-268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8)
- HIMMELSTOSS, E. A., HENDERSON, R. E., KRATZMANN, M. G., & FARRIS, A. S. (2018). *Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide*, No. 2018-1179. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>
- KANKARA, R. S., SELVAN, S. C., MARKOSE, V. J., RAJAN, B., & AROCKIARAJ, S. (2015). Estimation of long and short-term shoreline changes along Andhra Pradesh coast using remote sensing and GIS techniques. *Procedia Engineering*, v. 116, p. 855-862. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.374>
- KARUNARATHNA, H., BROWN, J., CHATZIRODOU, A., DISSANAYAKE, P., & WISSE, P. (2018). Multi-timescale morphological modelling of a dune-fronted sandy beach. *Coastal Engineering*, v. 136, p. 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.03.005>
- LEAL, R.A., BARBOZA, E.G. & BITENCOURT, V.J.R. (2022). Interdecadal climate variability identified in aeolian deposits in southern Santa Catarina, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 113, 103636. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103636>
- LEAL, R.A., BARBOZA, E.G., ANDRADE, M.M. & BITENCOURT, V.J.B. (2023). Fatores Condicionantes na Formação do Delta Intralagunar Invertido da Lagoa Urussanga Velha, Sul de Santa Catarina, Brasil. *Pesquisas Em Geociências*, 50(3), e133807. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.133807>
- LEANDRO, C. G.; BARBOZA, E. G.; CARON, F.; DE JESUS, F. A. (2019). GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 162, p. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.002>
- LELIEVELD, B., HERLIHY, D., BAKER, M., ROWE, R., & THOMAS, R. (2018). *An Investigation into Sand Dune Variation and Stability at Tūhaitara Coastal Park*. University of Canterbury. Group Report.
- LIMA, L. G., DILLENBURG, S. R., MEDEANIC, S., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C., TOMAZELLI, L. J. & CARON, F. (2013). Sea-level rise and sediment budget controlling the

- evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 42, p. 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.07.002>
- LIMA, S. F., ALMEIDA, L. E., & TOLDO JR., E.E. (2001). Estimativa da Capacidade de Transporte Longitudinal de Sedimentos a partir de Dados de Ondas para a Costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, v. 28, n. 2, p. 99-107. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.20272>
- LIU, X., XIA, J. C., WRIGHT, G., ARNOLD, L., & LIU, Q. (2014). Multi-criteria decision-making on the position of high water mark. *Ocean & coastal management*, v.102, pp.191-199. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.09.009>
- MACHADO, A. A., & CALLIARI, L. J. (2016). Synoptic systems generators of extreme wind in Southern Brazil: atmospheric conditions and consequences in the coastal zone. *Journal of Coastal Research*, v.75, p. 1182-1186. <https://doi.org/10.2112/SI75-237.1>
- MACHADO, A. A., CALLIARI, L. J., MELO FILHO, E., & KLEIN, A. H. D. F. (2010). Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v.5, n.2, p. 105-114. <http://repositorio.furg.br/handle/1/5101>
- MARTINHO, C. T., DILLENBURG, S. R., & HESP, P. (2009). Wave energy and longshore sediment transport gradients controlling barrier evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 25, n. 2, p. 285-293. <https://doi.org/10.2112/06-0645.1>
- MARTINHO, C.T.; HESP, P.A. & DILLENBURG, S.R. (2010). Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, v. 117, p.14-32. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.002>
- MITCHUM Jr., R.M.; VAIL, P.R. & SANGREE, J.B. (1977). Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In PAYTON, C.E. (org.) *Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, v. 16, p. 117-123. <https://doi.org/10.1306/M26490C8>
- MOTTA, L. M., TOLDO, E. E., DE SÁ, L. E., DE ALMEIDA, B., & NUNES, J. C. (2015). Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, v. 73, n. 3-4, p. 49-69. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/404
- MOTTA, V. (1969). Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra de Rio Grande. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas*, UFRGS, Porto Alegre,
- NEAL, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems, and progress. *Earth-Science Reviews*, v.66, p. 261-330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- NICOLODI, J. L., DE FIGUEIREDO, S. A., TOLDO JR, E., & CALLIARI, L. J. (2021). Regional Coastline Changes and Future Predicted Scenario on Southern Brazil. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, v. 1, p. 76-95. <https://doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Nicolodi76>
- NOWTZKI, A. L. (2019). *Influência das feições geomorfológicas na estrutura vegetacional de uma praia arenosa do Rio Grande do Sul-Brasil*. Imbé, 30 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharel em Ciências Biológicas com ênfase em Gestão Ambiental Marinha e Costeira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <http://hdl.handle.net/10183/206782>
- OLIVEIRA, E. B. & ROSA, M. L. C. C. (2022). Classificação supervisionada dos elementos arquiteturais da Praia das Cabras, Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 49(1), e107440. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.107440>

- OLIVEIRA, J. F., BARBOZA, E. G., MARTINS, E. M., & SCARELLI, F. M. (2019). Geomorphological and stratigraphic analysis applied to coastal management. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102358. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102358>
- OLIVEIRA, J. F., SCARELLI, F. M., MANZOLLI, R. P., PORTZ, L. C., & BARBOZA, E. G. (2020). Geomorphological responses due to storm wave events at Praia da Barra, Garopaba–Santa Catarina state, southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 95, p. 474-478. <https://doi.org/10.2112/SI95-092.1>
- OLIVEIRA, U. R., SIMÕES, R. S., CALLIARI, L. J., & GAUTÉRIO, B. C. (2019). Erosão de dunas sob ação de um evento extremo de alta energia de ondas na costa central e sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 1, p. 137-158. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1352>
- OLIVEIRA, U. R., SIMÕES, R. S., GAUTÉRIO, B., & ESPINOZA, J. (2017). Impactos do ciclone extratropical de outubro de 2016 sobre localidades costeiras do litoral médio e sul do Rio Grande do Sul. In: X ENCONTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO, 2017, Rio Grande. *Anais...* Rio Grande, ENCOGERCO.
- OYEDOTUN, T. D. (2014). Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. *Geomorphological Techniques*, v. 3, n. 2.2, p. 1-12.
- PARISE, C.K.; CALLIARI, L.J. & KRUSCHE, N. (2009). Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 57, n. 3. p. 175-188. 10.1590/s1679-87592009000300002
- PILKEY, O.H.; NEAL, W.J. & BUSH, D.M. (2009). Coastal erosion. In: ISLA, F.I. & IRIBARNE, O. (Eds.), *Coastal Zones and Estuaries*. Eolss Publishers Co. Ltd., Oxford, p. 32-42.
- POLLARD, J. A., BROOKS, S. M., & SPENCER, T. (2019). Harmonising topographic & remotely sensed datasets, a reference dataset for shoreline and beach change analysis. *Scientific data*, v.6, n. 42, p. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0044-3>
- QUADRADO, G. P., DILLENBURG, S. R., GOULART, E. S., & BARBOZA, E. G. (2021). Historical and geological assessment of shoreline changes at an urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v. 42(1), 101622. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101622>
- ROSA, M. L. C. C.; HOYAL, D.; BARBOZA, E. G.; FEDELE, J. & ABREU, V. S. (2016). River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. *SEPM*, v. 106, n. 13, p. 1-22. <https://doi.org/10.2110/sepmsp.106.13>.
- ROSA, M. L. C. D. C.; BARBOZA, E. G.; ABREU, V. D. S.; TOMAZELLI, L. J. & DILLENBURG, S. R. (2017). High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, v. 47, n. 2, p. 183-207, <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160138>
- RS. Rio Grande do Sul. (2020). *Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul*. 5ª ed., Porto Alegre, Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 205p.
- SAAD, R., GERARD, J. A., & GERARD, P. (2021). Detection of the shoreline changes using DSAS technique and remote sensing: a case study of Tyre Southern Lebanon. *Journal of Oceanography and Marine Research*, v. 9, l. 11, n. 1000004, p. 1-18.
- SAAD, R., KALLAS, A., GÉRARD, J. A., & GÉRARD, P. (2022). Importance of Beach Evaluation for Integrated Coastal Zone Management. *Bull. Soc. R. Sci. Liege*, v. 91, n.1, p. 59-83. doi:10.25518/0037-9565.10907

- SCARELLI, F. M., CANTELLI, L., BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C., & GABBIANELLI, G. (2016). Natural and Anthropogenic coastal system comparison using DSM from a low-cost UAV survey (Capão Novo, RS/Brazil). *Journal of Coastal Research*, v.75 (sp1), p. 1232-1236. <https://doi.org/10.2112/SI75-247.1>
- SCARELLI, F. M., SISTILLI, F., FABBRI, S., CANTELLI, L., BARBOZA, E. G., & GABBIANELLI, G. (2017). Seasonal dune and beach monitoring using photogrammetry from UAV surveys to apply in the ICZM on the Ravenna coast (Emilia-Romagna, Italy). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 7, p. 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.003>
- SCHWARZER, K., DIESING, M., LARSON, M., NIEDERMEYER, R. O., SCHUMACHER, W., & FURMANCZYK, K. (2003). Coastline evolution at different time scales—examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea. *Marine Geology*, v. 194, n. 1-2, p. 79-101. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00700-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00700-4)
- SERPA, C.G.; ROMEU, M.A.R.; FONTOURA, J.A.S.; CALLIARI, L.J.; MELO, E. & ALBUQUERQUE, M.G. (2011). Study of the responsible factors for the closure of an intermittent washout during a storm surge, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, v. 64, p. 2068-2073. <https://www.jstor.org/stable/26482540>
- SPERANSKI, N. S. & CALLIARI, L. J. (2006). Padrões de refração de ondas para a costa do Rio Grande do Sul e sua relação com a erosão costeira. In: MUEHE, D.C.E.H. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, P. 446-454.
- STIVE, M. J., AARNINKHOF, S. G., HAMM, L., HANSON, H., LARSON, M., WIJNBERG, K. M., NICHOLLS, R.J. & CAPOBIANCO, M. (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal engineering*, v. 47, n. 2, p. 211-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6)
- TOLDO JR., E. E., ALMEIDA, L. E. S. B., NICOLODI, J. L., & MARTINS, L. R. (2006a). Erosão e acreção da zona costeira. In: MUEHE, D.C.E.H. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 468-475.
- TOLDO JR., E.E., ALMEIDA, L., NICOLODI, J. L., ABSALONSEN, L., & GRUBER, N. (2006b). O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, v. 33, n. 2, p. 35-42. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.19511>
- TOMAZELLI, L.J. & VILLWOCK, J.A. (2000). O Cenozóico do Rio Grande do Sul: Geologia da planície costeira. In: HOLZ, M & DeROS, L.F. (Eds), *Geologia do Rio Grande do Sul*. Edição CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406.
- TOMAZELLI, L.J., DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E., ROSA M.L.C.C., MANZOLLI, R.P. & CARON, F. (2013). Processos de transferência de sedimentosa durante a transgressão de barreiras arenosas costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 14, 2013, Natal. *Anais...* Natal, ABEQUA, 1 CDROM. https://www.abequa.org.br/trabalhos/evocost_2014_27.pdf
- TOMAZELLI L.J., DILLENBURG S.R., BARBOZA E.G. & ROSA M.L.C.C. (2008) Geomorfologia e Potencial de Preservação dos Campos de Dunas Transgressivos de Cidreira e Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul Brasil. *Pesquisas em Geociências* 35(2), 47-55. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.17936>
- VAN RIJN, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, v. 54, n. 12, p. 867-887. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>
- VIANNA, H. D., & CALLIARI, L. J. (2019). Diversidade morfológica das dunas frontais no litoral norte do Rio Grande Do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n.2, p. 339-359. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i2.1473>

VIANNA, H. D., CALLIARI, L. J., & VIANNA, S. D. (2020). Inundação e erosão na costa norte do Rio Grande do Sul-Brasil. estudo de caso: a maré meteorológica de outubro de 2016. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, V. 21, n. 4, p. 719-739. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1749>

VIANNA, H.D. & CALLIARI, L.J. (2015). Variabilidade do Sistema praia-dunas frontais para o litoral norte do Rio Grande do Sul (Palmares do Sul a Torres, Brasil) com o auxílio do *Light Detection and Ranging – Lidar*. *Pesquisas em Geociências*, v.42, n.2, p.141-158. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78116>

VILLWOCK, J.A. & TOMAZELLI, L.J. (1995). Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas*, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, v.8, p. 1-45.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, FL.A. & DEHNHARDT, B.A. (1986). Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: RABASSA, J. (Ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 4, pp.79-97. <https://doi.org/10.1201/9781003079316-5>

VOUSDOUKAS, M.I.; ALMEIDA, L.P.M. & FERREIRA, O. (2012). Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 37, n. 6, p. 583-593. <https://doi.org/10.1002/esp.2264>

WATANABE, D.S.Z.; BARBOZA, E.G.; ROSA, M.L.C.C.; DILLENBURG, E.G.; CARON, F.; RITTER, M.N.; BITENCOURT, V.J.B. & MANZOLLI, R.P. (2023). Geomorfologia e padrões de empilhamento da barreira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 1, e2223. <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2223>.

WILLIAMS, R. (2012). DEMs of difference. *Geomorphological Techniques*, v.2, n.3.2, p. 1-12. <https://hdl.handle.net/2160/35998>

4. SHORELINE CHANGE ASSESSMENT AT ARROIO DO SAL (BRAZIL) USING DIFFERENT SHORELINE EXTRACTION METHODS

Elaine B.de Oliveira & Eduardo G. Barboza

Submetido e publicado na Revista *Remote Sensing Applications: Society and Environment*

<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101303>

Abstract:

This research aims to compare different shoreline extraction methods in assessing shoreline variability at Arroio do Sal, Southern Brazil. The methodology included the automatic extraction of shoreline positions by CoastSat and Cassie and the manual vectorization of shorelines using two different shoreline proxies. Digital Shoreline Analysis System was used to compute the shoreline displacement for each extraction method and shoreline mission. The results were compared in terms of rates, uncertainties, and methodologies. The results show that the CoastSat lines are generally displaced towards the land, while Cassie is displaced towards the sea. To concerning shape, Cassie has a more undulating shape and a greater number of indentations, with more exaggerated features, while CoastSat has a more rectilinear line, with smoother indentations next to the washouts. The RMSE values are 8.89 m for CoastSat and 27.27 m for Cassie. Despite the variations in the coastline position between the algorithms, the analyses of the rates of change have similar trends. Both algorithms establish an erosion trend for the Sentinel lines, but with different magnitudes; for the Landsat lines, both algorithms show a stable coastline, with the same average and uncertainty. Arroio do Sal can be considered a stable coastline, with rates of change in the -0.5 m– 0.5 m range. Both algorithms were able to determine this general trend.

Keywords: Sandy beach; LRR; DSAS; CoastSat; Cassie; Google earth engine

List of abbreviations:

CASSIE Coastal Analyst System from Space Imagery Engine
DSAS Digital Shoreline Analysis System
DT Dune Toe
ESRI Environmental Systems Research Institute
ETM+ Enhanced Thematic Mapper Plus
FES Finite Element Solution

GEE Google Earth Engine
GIS Geographic Information System
GPS Global Positioning System
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LRR Linear Regression Rate
IWL: Instantaneous Waterline
MNDWI Modified Normalized Difference Water Index
MSI Multispectral Instrument
NDWI Normalized Difference Water Index
OLI Operational Land Imager
RMSE: Root Mean Square Errors
ROI Region of interest
RS Rio Grande do Sul
SDS Satellite-Derived Shorelines
TM Thematic Mapper
TOA Top Of Atmosphere
USGS United States Geological Survey
WI Water Index

4.1. Introduction

Sandy beaches are dynamic environments that adjust quickly in response to environmental conditions (Vos et al., 2023). These changes occur over various timescales, varying significantly in temporal and spatial terms (Konstantinou et al., 2023). To comprehend natural oscillations and manage the coast effectively, shorelines must be detected, quantified, and forecasted using a robust and repeatable technique (Boak and Turner, 2005). Despite the importance, long-term coastal monitoring remains scarce and limited in both time and space (Tsiakos and Chalkias, 2023; Vitousek et al., 2023).

According to Vitousek et al. (2023), the shoreline at the past was digitized from different sources, including aerial photos and 'Tsheets', which were very limited in time and space, but with the improvement of technologies, including methods such as RTK-GPS, CoastSnap, drones, aerial photogrammetry, and airborne lidar, the spatiotemporal resolution increased. These conventional in situ measurements, however, despite being reliable, are costly, labor intensive, and limited to local scales (Do et al., 2019; Taveneau et al., 2021). Hence, the future of coastal change monitoring is represented by earth-observing satellites since they offer the opportunity for investigating shoreline evolution over decades at regional to global scales, with moderate spatial resolution and short timescale (Konstantinou et al., 2023; Vitousek et al., 2023).

The free availability of Landsat and Sentinel satellites archives, together with the rise of cloud-based computing platforms, such as Google Earth Engine, has allowed access to powerful datasets (Gorelick et al., 2017; Pardo-Pascual et al., 2018; Konstantinou et al., 2023). Emerging technologies integrating these high-resolution satellite imagery and algorithms that allow for the automatic extraction of shorelines (Luijendijk et al., 2018; Vos et al., 2019; Sánchez-García et al., 2020; Almeida et al., 2021; Palomar-Vázquez et al., 2023) have the potential to transform coastal research into a data-rich environment (Tsiakos and Chalkias, 2023; Vitousek et al., 2023). The long-term data series obtained through these technologies can help to estimate the rates and causes of coastal erosion, assess morphological variations and engineering modifications, create coastal land use planning, understand the effects of climate change, and predict future shoreline positions (Anders and Byrnes, 1991; Crowell et al., 2019).

CoastSat (Vos et al., 2019) and Cassie (Almeida et al., 2021) are two publicly available algorithms that extract shorelines automatically. Both tools retrieve satellite images on Google Earth Engine (GEE) to detect shorelines using the instantaneous interface between water and sand as a proxy. The motivation for the current study to focus on CoastSat versus Cassie among the available tools is due to two primary reasons. First, both methods are open-source and freely available for use. Secondly, Cassie was chosen because it was developed in Brazil, where this study is located and has a different implementation format. Comparing its accuracy with a more widespread tool, such as CoastSat, could highlight the strengths and weaknesses of both. In addition, studies comparing the accuracy of different extraction methods are still scarce, and the existing ones are not located in Brazil.

Conducting a comparative study of different shoreline extraction methods is highly beneficial, particularly for a country like Brazil with its extensive 8500 km coastline, which remains largely unexplored and data-scarce in many sectors. Researchers can determine the most suitable methods for different regions by assessing the effectiveness of various techniques. Moreover, increasing the number of accuracy studies will further enhance these algorithms, driving continuous improvements. Ultimately, the findings from such comparative analyses can significantly impact future research by highlighting how the choice of technique influences outcomes, leading to more accurate and reliable shoreline data.

Hence, the main purposes of this study are (1) to compare the shoreline positions and change rate results of different shoreline extraction techniques, including CoastSat, Cassie, and manually delineated shorelines, and (2) to detect shoreline changes along the Arroio do Sal coastline in Southern Brazil.

4.2. Material and Methods

4.2.1. Study area:

Arroio do Sal is located on the northern coast of Rio Grande do Sul (RS), Southern Brazil (Fig. 4.1). The southern coast of Brazil developed at the Quaternary through the reworking of alluvial fan deposits during the various transgressive-regressive glacioeustatic cycles, leading to the generation of barrier lagoon-type depositional systems, called, from the oldest to the most modern, systems I, II, III, and IV (Villwock et al., 1986; Villwock and Tomazelli, 1995; Tomazelli and Villwock, 2000). The shoreline, formed by the Holocene barrier (Barrier IV), is a high-frequency depositional sequence marked by gentle coastal projections and embayments (Dillenburg et al., 2009, 2024; Barboza and Rosa, 2014; Rosa et al., 2017). In this region, Barrier IV presents a progradational stratigraphic stacking pattern (Rocha et al., 2018). During the middle and late Holocene, the sea-level behavior for the RS coast shows a long-time fall from 1.9 m above the current level (Barboza et al., 2021).

The coast of Rio Grande do Sul is dominated by waves with a significant height of 1.5 m and a microtidal regime, with the tides semidiurnal with a 0.5 m range (Motta, 1969; Calliari et al., 1998). The littoral drift is bidirectional and alternating (Motta et al., 2015). The climate is temperate subtropical, and the rainfall is relatively well distributed throughout the year, with an average precipitation of 1300 mm annually (RS, 2020). The predominant wind is from the northeast (Figueiredo and Calliari, 2005). The beaches at Arroio do Sal are predominantly dissipative (Weschenfelder and Zouain, 2002), with fine sands, well-rounded grains, and marked homogeneity of textural parameters (Weschenfelder, 1996).

Arroio do Sal has a resident population of 11,057 people, but it reaches 120,000 during the high season. Moreover, 72% of the homes in the municipality are for occasional use (IBGE, 2023), which illustrates the importance of tourism for the local economy. Along its length, the shoreline at Arroio do Sal swings between densely populated areas and vacant spots (Strohaecker et al., 2014). The northern sector of the coast is more developed, having a flatter beach face, narrower post-beach areas

with low slopes, a narrower frontal dune system, and low dunes. In contrast, the southern part is less densely populated, with more vegetated dunes, steeper beach faces, and wider and more extensive post-beach areas (Strohaecker et al., 2014).

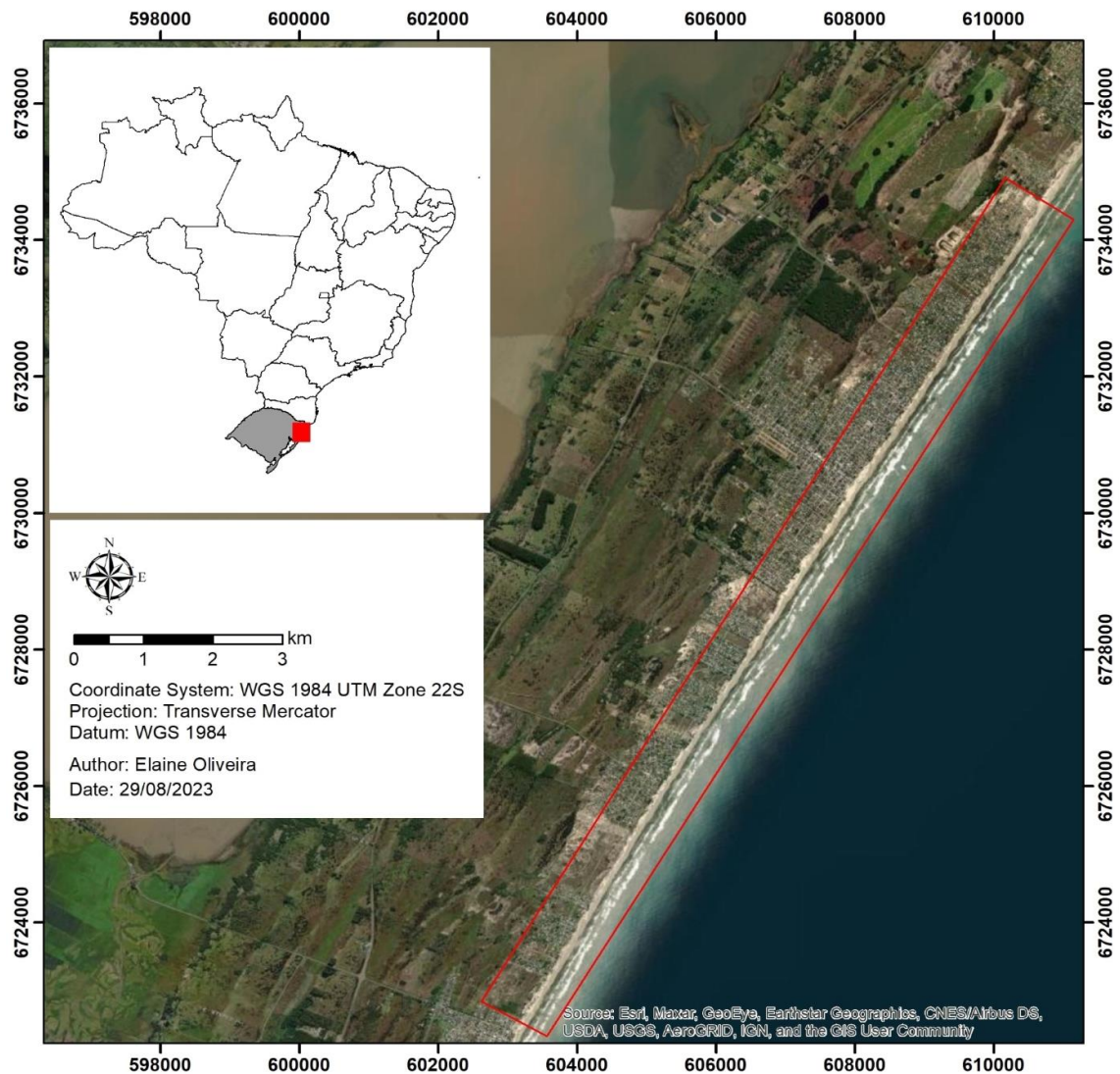


Figure 4.1: Location of the Study Area at Arroio do Sal, Rio Grande do Sul, Brazil. Imagery source: ESRI®. Maps source: IBGE.

4.2.2. Algorithms:

CoastSat (Vos et al., 2019) and Cassie (Almeida et al., 2021) were selected to test the accuracy of automatic shoreline extraction in Arroio do Sal, RS. CoastSat has been applied in 15 countries to categorize the shoreline change rates (Bhagya et al., 2022; Castelle et al., 2022; Curoy et al., 2022; Loayza et al., 2023), to evaluate nourishment projects (McGill et al., 2022), and to test the accuracy of the tool in different tide environments (Castelle et al., 2021; Konstantinou et al., 2023). Cassie, on the other hand, is less explored and was mostly applied to gray literature (Franco,

2021; Castro, 2022; Lins, 2022); however, one article has applied the method to analyze the shoreline variability (Osako and Oliveira Junior, 2023), and another to assess the impacts of armoring (Koerich and Pereira, 2023). Only one article compared both algorithms was found (Vos et al., 2023). Table 4.1 shows the description of both algorithms.

Table 4.1: Description of the satellite-derived-shoreline algorithms used at this study.

	CoastSat	Cassie
<i>Resolution</i>	Sub-pixel (Machine learning)	At pixel
<i>Shoreline detection</i>	MNDWI	NDWI
<i>Reflectance (Landsat)</i>	Top of Atmosphere (TOA)	Surface reflectance (SR)
<i>Open source</i>	Yes	Yes
<i>Cloud-based</i>	No	Yes
<i>Interface</i>	Python toolkit	Webtool
<i>Functionality</i>	Shoreline extraction; retrieval of images from GEE archive; time-series of shoreline position along shore-normal transects	Extract shorelines; perform statistical analysis
<i>Pre-processing</i>	Cloud masking; pan-sharpening, and down-sampling	Mosaicking, image registration, and % cloud
<i>Mechanism of improvements</i>	Tidal correction; interactive checking and manual adjustment of detections; possibility of setting a reference shoreline	Option to filter out images potentially unsuitable for analysis.
<i>Image classification</i>	Supervised image classification (Neural Network classifier)	Otsu's thresholding
<i>Transects</i>	Manually digitize or import the coordinates from a file	Defined by spacing and length
<i>Export format</i>	Geoson layer	ESRI shapefile
<i>Language</i>	English	English or Portuguese

4.2.3. Methods:

The methodology comprised three main steps (Fig. 4.2). Firstly, the shoreline positions were extracted automatically by using two different methods: CoastSat v.2.3 (Vos et al., 2019) and Cassie (Almeida et al., 2021). The application of CoastSat followed the flowchart of Vos et al. (2019). The satellite missions chosen to retrieve the images from GEE were Landsat 5 (TM), 7(ETM+), 8 (OLI), and Sentinel-2 (MSI). The time period selected was expanded from January 1, 1984 to December 31, 2021. Table 4.2 summarizes the satellite data available on GEE used in this research. The region of interest (ROI) and the EPSG code of the spatial reference system were set. The 'CoastSat' retrieved 2280 images, and 396 were selected for shoreline analysis after the pre-processing and classification processes. The shorelines were exported as a *.geojson file for further investigation in a GIS environment.

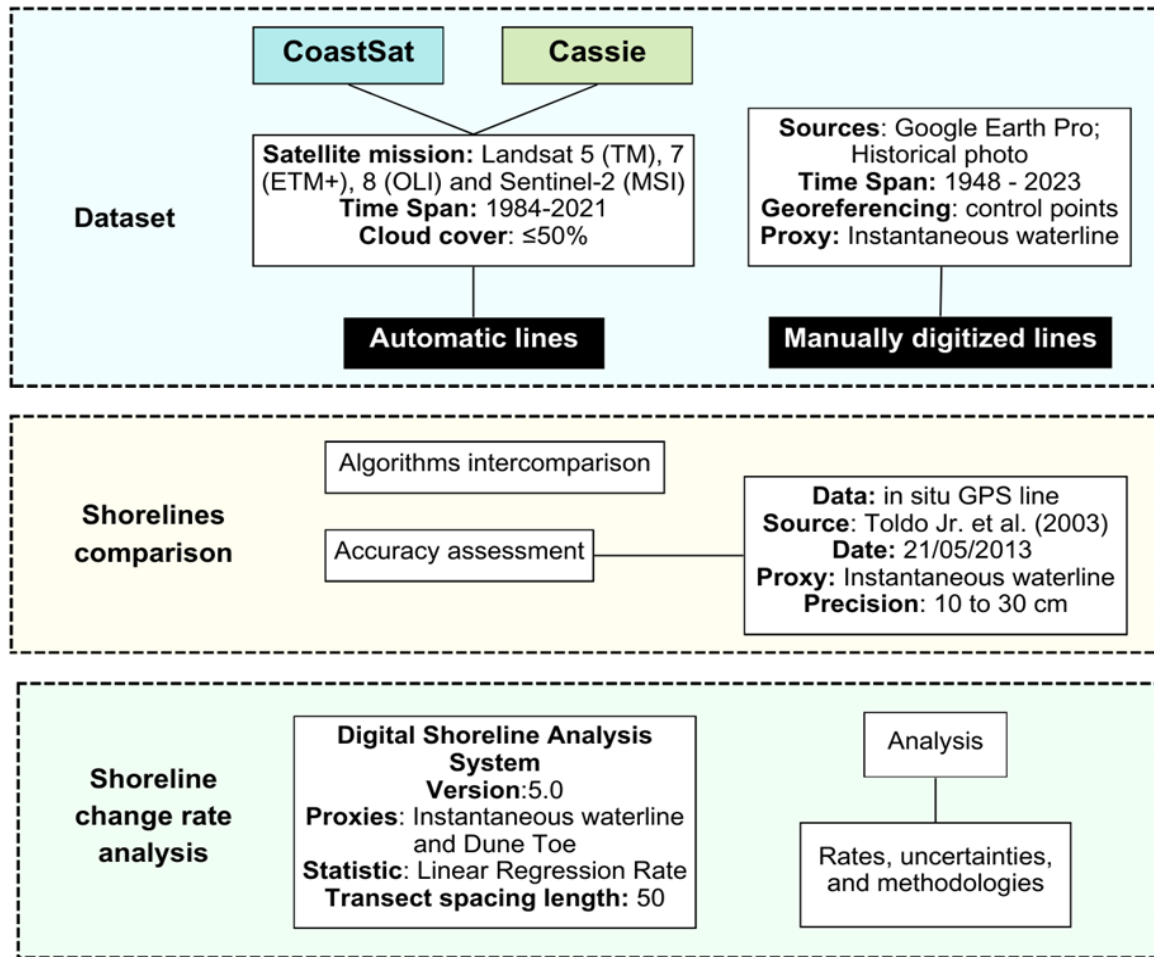


Figure 4.2: Flowchart of the overall methodology for assessing the shoreline changes and the accuracy of the algorithms.

The tide correction contemplated by the method was also carried out. According to Vos et al. (2020), tidal correction is the projection of individual instantaneous shorelines, collected at various tide stages, to a standard reference elevation. The tidal correction uses tide levels and beach slope. The beach slope was defined as 0.057 according to Dillenburg et al. (2000). The tide levels were obtained from the FES2014 global tide model. FES2014 was produced by Noveltis, Legos, and CLS and distributed by Aviso+, with support from Cnes (<https://www.aviso.altimetry.fr/>).

Table 4.2: Summary of the different datasets of satellite imagery available on GEE

Mission	Coverage	Revisit Time (days)	Pixel resolution (m)
Landsat 5 (TM)	1984-2013	16	30
Landsat 7 (ETM+)	1999-present	16	30
Landsat 8 (OLI)	2013-present	16	30
Sentinel 2 (MSI)	2015 – present	5	10

Cassie was applied twice through the web platform² to select both satellite missions available (Landsat or Sentinel-2). The workflow is explained by Almeida et al. (2021). The period was expanded from November 22, 2015 to January 01, 2022 for Sentinel and from May 03, 1984 to January 01, 2022 for Landsat. The region of interest (ROI) was defined using a polygon, and cloud cover was set at 50% or less. 132 images from Sentinel and 252 from Landsat were selected. The shorelines were exported as a shapefile for further analysis.

The accuracy of the shoreline position was verified by comparing it with the shoreline field survey data provided by Toldo Jr. et al. (2003). The field data was acquired on May 21, 2013 from a Pathfinder Trimble® Pro-XRS GPS, with 10–30 cm precision in navigation mode in both the vertical and horizontal directions. The GPS receiving antenna was installed on a traction vehicle that moved along the water line at an average speed of 50 km/h. In contrast, the static GPS antenna was installed at the Geodetic Department at the Geosciences Institute of UFRGS (Toldo Jr. et al., 2003). The sample time for both pieces of equipment was 3 s. Data generated from the stationary antenna was used to correct data from the field, creating files for post-processing with submetric resolution (Toldo Jr. et al., 2003). Accuracy metrics, including horizontal distance, mean bias, and root mean square errors (RMSE), were calculated.

Following was the manual vectorization of shorelines from satellite images obtained from Google Earth Pro and an aerial photograph from 1948. Eight satellite images covering 11 years (2012–2023) were selected based on availability across the area and cloud cover. The input images, taken at a scale of 1:3000 and used to create mosaics for each year, were previously processed in ArcMap™ 10.5, based on control points taken from the platform and located on distinguishable structures (e.g., corners, roofs, and fences). The 1948 aerial photograph was obtained by the USGS on a 1:20,000 scale and was digitized, georeferenced, and made available by the Center for Coastal and Oceanic Geological Studies (CECO-UFRGS). The shoreline was defined according to two proxies, the instantaneous waterline (IWL) and the dune toe (DT), to compare the results with the automatic extraction methods and to check the variation in rates and uncertainties using different proxies. The errors in calculating

² <https://cassiengine.org/>

shoreline changes were estimated according to the method described by Del Río and Garcia (2013).

The next step was the application of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) to compute the shoreline displacement for each extraction method and satellite mission. DSAS is an ArcGIS® extension used to compute the rate of shoreline change statistics for a time series of shoreline positions (Saad et al., 2021). The analysis followed the steps described in Himmelstoss et al. (2018). The Linear Regression Rate (LRR) was selected to calculate the statistics. LRR is an easy computational method, calculated using the least squares approach, including all the shoreline data available, regardless of trends or accuracy (Himmelstoss et al., 2018). The statistic was calculated within a 95% confidence interval for each transect. Transects were spaced 50 m apart, and the baseline was set onshore, 500 m from the current shoreline, to avoid intersecting with historical shorelines. The rates of shoreline change were classified according to Esteves and Finkl Jnr. (1998), as shown in Table 4.3. Finally, the DSAS results obtained using different shoreline extraction methods were compared in terms of rates, uncertainties, and methodologies.

Table 4.3: Classification of the rates of shoreline change according to Esteves and Finkl Jnr. (1998).

Classes	Definition
Accreted	>0.5 m/yr
Stable	-0.5 to 0.5 m/yr
Eroded	-0.5 to -1 m/yr
Critically eroded	<-1 m/yr

4.3. Results

4.3.1. Automatic shoreline extraction:

Here, we compare the instantaneous shoreline position derived from two automatic shoreline extraction algorithms. No wave or tide configuration correction is included at this analysis stage. Both methods could extract a good number of lines across the period of 37 years; CoastSat extracted 396 lines (282 from Landsat and 114 for Sentinel), while Cassie extracted 252 lines from Landsat and 132 from Sentinel. Lines that coincided in both algorithms (95 Sentinel lines and 150 Landsat lines) were selected for analysis.

Figure 4.3 shows the lines in both algorithms. Cassie lines are displayed more seaward than CoastSat in the two satellite missions. Moreover, the lines extracted from Landsat are generally smoother and more regular than those from Sentinel in both

methods. The parts with the most indentations are near washouts and drainage channels. These points are also the regions where the algorithms differ the most; the innermost line for both techniques is from December 05, 2016. Today, the Cassie line is more landward than the CoastSat line in some sectors. This shoreline position is the reflex of an extratropical cyclone that occurred in October of 2016 and was responsible for a severe retreat of the shoreline in the whole RS coast, with erosion values ranging from 5 to 13.7 m (Albuquerque et al., 2018; Vianna et al., 2020; Oliveira et al., 2019).

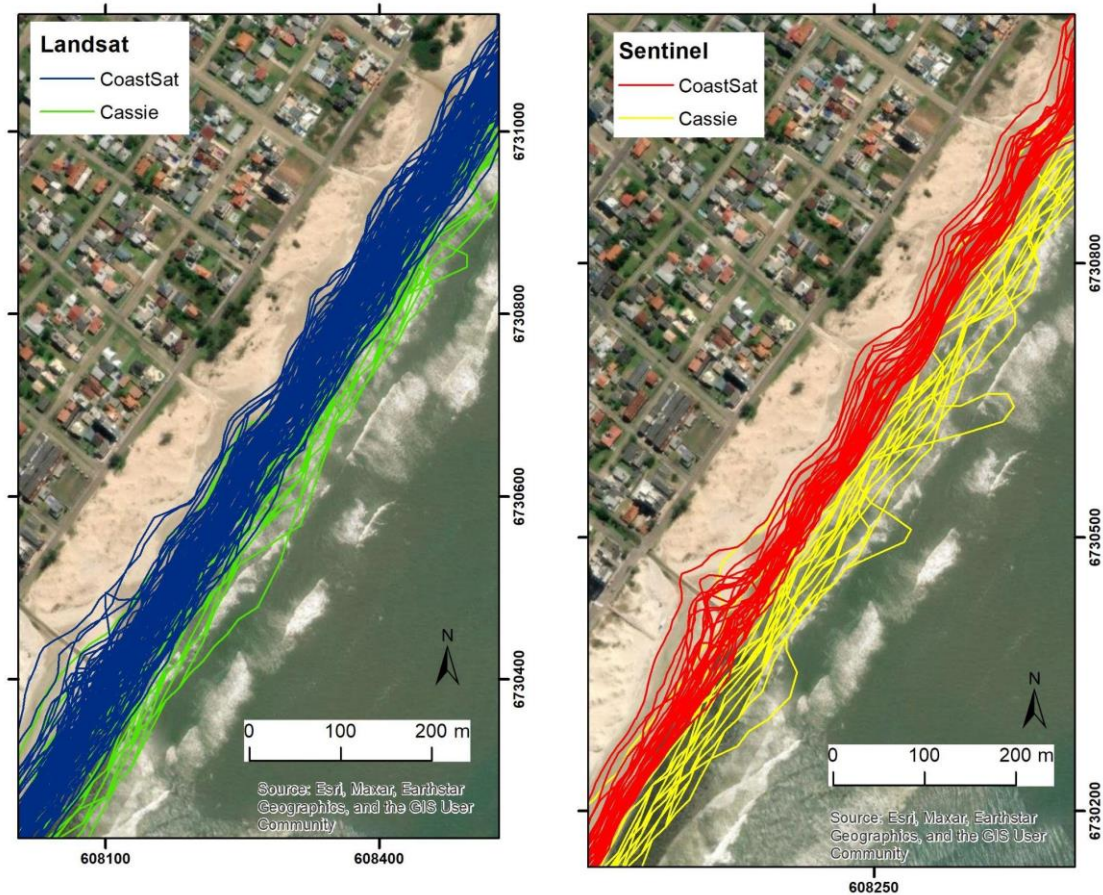


Figure 4.3: Comparison of shoreline positions extracted from Landsat (left) and Sentinel (right) from both algorithms. Imagery source: ESRI® Basemap

Regarding the lines from Landsat specifically, the extraction methods have an average difference of 20 m. For Sentinel, the difference is smaller, with many sectors less than 5 m; however, there are points where the difference is greater than that of Landsat. The line from November 26, 2018, for example, has more than a hundred meters of difference between the algorithms, with Cassie's line receding more than 50 m from the midline towards the ocean at specific points. These outliers (differences in horizontal displacement) are recurrent among some of the lines from Sentinel.

4.3.2. Accuracy:

The accuracy assessment between the algorithms and the surveyed shoreline is presented in Figure 4.4. The line surveyed in the field is from May 21, 2013, while the algorithm lines comprise the line automatically extracted from the Landsat satellite image of June 4, 2013. The line from CoastSat has a mean horizontal difference of 4.29 m and a standard deviation of 4.03m from the 2013 GPS line. The RMSE is 8.89 m and the Mean Error (bias) is 5.07 m. Meanwhile, the line from Cassie has a mean horizontal difference of -20.8 m, with a standard deviation of 7.1 m. The RMSE is 27.27 m and the bias is 24.59 m. Cassie's shoreline position seems to agree more with the wave break line, representing the indicator shore break maximum intensity (Boak and Turner, 2005).

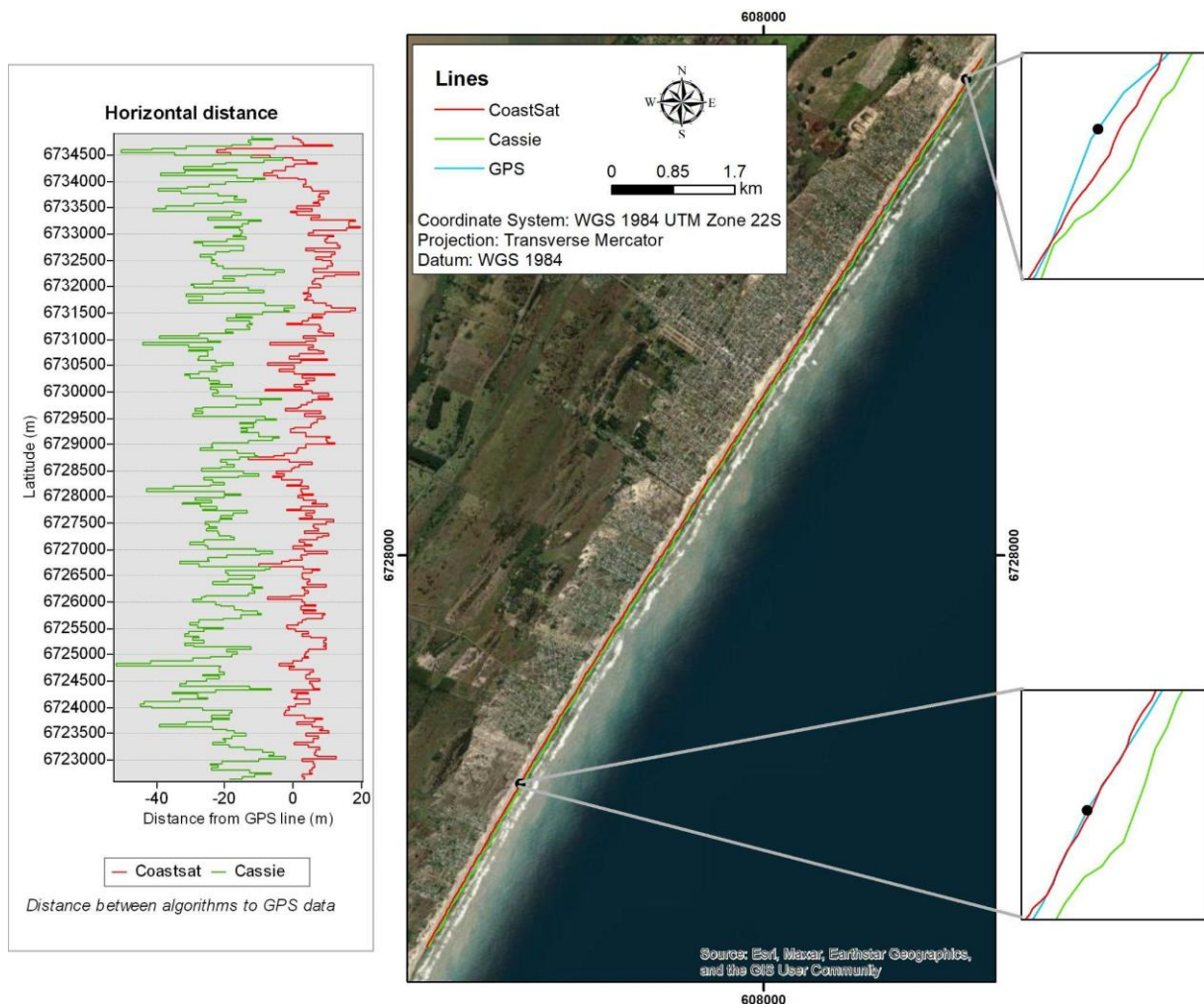


Figure 4.4: Evaluation of the accuracy of the shoreline algorithms. Graph showing the horizontal error distributions for each method. Positive (negative) errors indicate a displacement towards the land (towards the sea). The points represent the area with a higher difference for each algorithm. Imagery source: ESRI® Basemap

4.3.3. Changes in shoreline

DSAS was applied eight times. Three for each algorithm, one using only the Landsat lines, another with Sentinel, and a third combining the lines from both satellites. The other two analyses include lines vectorized manually using two different shoreline proxies. Table 4.4 shows the Linear Regression Rate (LRR) for each analysis. The results show that the coast can be considered stable throughout the years, with a median value of -0.07 m and a mean value of -0.34 m. The highest value (0.42 m) was obtained using the manually digitalized lines using the IWL as a proxy. The analysis provided the lowest rate (-2.42 m) using the Sentinel lines extracted from CoastSat. The highest uncertainty is from the analysis using the Sentinel lines extracted from Cassie.

Table 4.4: Linear Regression Rate for each analysis. IWL = Instantaneous Waterline; DT = Dune toe

	Cassie Landsat	Cassie Sentinel	Cassie All	Coastsat Landsat	Coastsat Sentinel	Coastsat All	Manual IWL	Manual DT
LRR average	0.07	-1.36	0.13	0.07	-2.42	0.3	0.42	0.04
Uncertainty	0.04	1.87	0.11	0.04	0.27	0.03	1.1	0.56
Erosional T.	37%	79%	31%	33%	97%	8%	19%	37%
Max erosion	-0.43	-6.61	-0.54	-0.58	-5.7	-1.59	-2.12	-4.82
Average	-0.16	-2.02	-0.14	-0.17	-2.52	-0.15	-0.77	-0.86
Accretional T.	63%	21%	69	67%	3%	92%	81%	63%
Max accretion	0.61	5.23	0.79	0.68	1.1	0.79	4.52	2.82
Average	0.2	1.04	0.26	0.18	0.32	0.34	0.69	0.56

The percentage of erosional and accretional transects also differs greatly between the satellites, which is expected due the different time scales. Sentinel lines (interannual scale) have more erosional than accretional transects for both algorithms. Landsat (interdecadal scale), on the other hand, shows more accretional transects. ‘Cassie – Sentinel’ has the most extreme values, with a maximum erosion of 6.61 m and a maximum accretion of 5.23 m. The classification of rates of change according to Esteves and Finkl Jnr. (1998) shows that the stable class is predominant in five analyses: those using Landsat and ‘all lines’ from both Cassie and CoastSat, and the assessment using the dune toe proxy. The analyses using only Sentinel lines have “critically eroded” as the predominant class. In contrast, the manually digitalized IWL is the only one in which the predominant class is accreted, as seen in Figure 4.5.

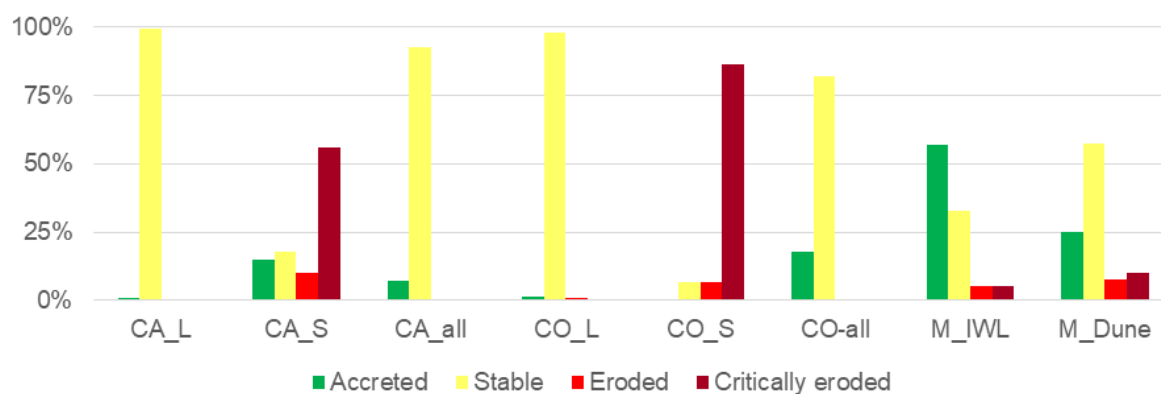


Figure 4.5: Classification of shoreline change rates for each analysis performed. Colors represent the classes. CA=Cassie, CO=CoastSat; S=Sentinel; all = Lines from both methods combined; L = Landsat; M = Manually digitalized; IWL = Instantaneous Waterline proxy; Dune = Dune toe proxy. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

The rates of shoreline change (LRR) for each transect are displayed in Figures 4.6 and 4.7. Although there is a slight difference between the algorithms, the results using only the Landsat lines show that the coast is stable, with change values of -0.5 to 0.5 m. The Cassie lines are classified as stable throughout the area, with hardly any accreted transects. In contrast, the CoastSat lines show very few transects with eroded and accreted classes (Fig. 4.6). The DSAS performance using the Sentinel lines completely changes the rates. There is now greater diversification of rates, with classes ranging from critically eroded to accretional. CoastSat classifies the majority of transects as eroding. However, the center area of Arroio do Sal is classified as stable. Cassie has a more varied distribution of classes, showing accretional and stable areas intercalated with erosion. Combining the lines from both satellites, the stable pattern returns in both algorithms, but with some accretional transects from the center to the northern part of the study area. Moreover, CoastSat has more accretional transects than Cassie.

It is important to remember that when the erosion/stability diagnosis varies according to the time period studied, it indicates that variations on other time scales may be relevant to the region's dynamics. The seasonal scale, for example, may play an important role in the study area, affecting the coast's interannual behavior.

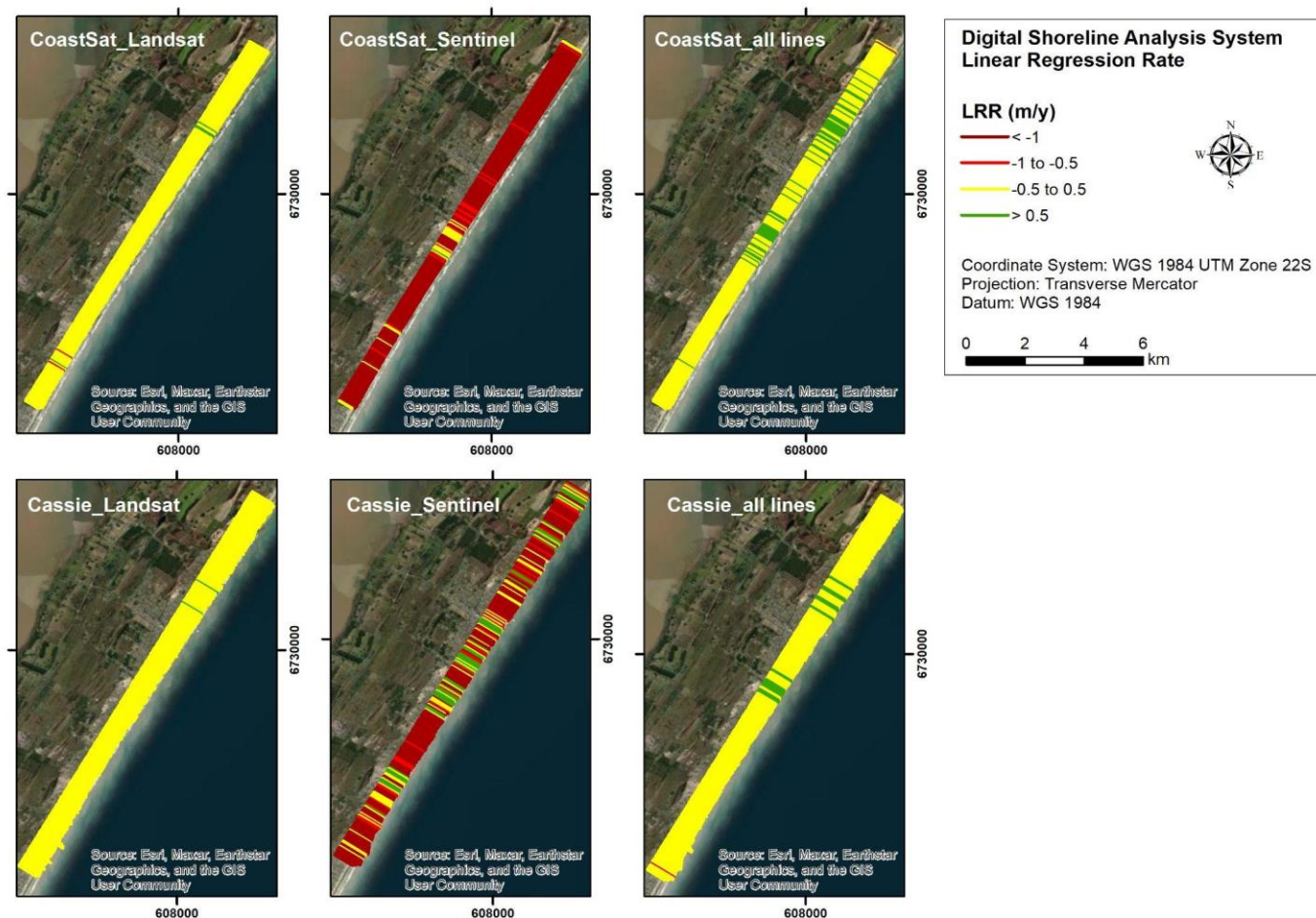


Figure 4.6: Shoreline change rates in meters per year. The color scheme represents the displacement trend, with hot tones indicating erosion and green tones representing accretion. Imagery source: ESRI® Basemap. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

The analysis using the manually digitalized shorelines is displayed in Figure 4.7. Differently from the algorithms, this result shows accretion from the center to the southern part of the study area and a few erosional transects from the center to the northern area. There is also an increase in the general number of accretional transects compared to the algorithms' results. Specifically, regarding the proxies, the differences between them are in the range of values and the proportion of classes. The dune toe proxy has a higher erosion value and a lower accretion value than the instantaneous waterline proxy. The extreme values differ, and the ratio between stable and accretion changes between the proxies. The DT has almost half the amount of accretional transects of the IWL. Spatially, the DT has more interspersed classes. The biggest difference is in the southern sector, where the reduction in accretional transects is evident.

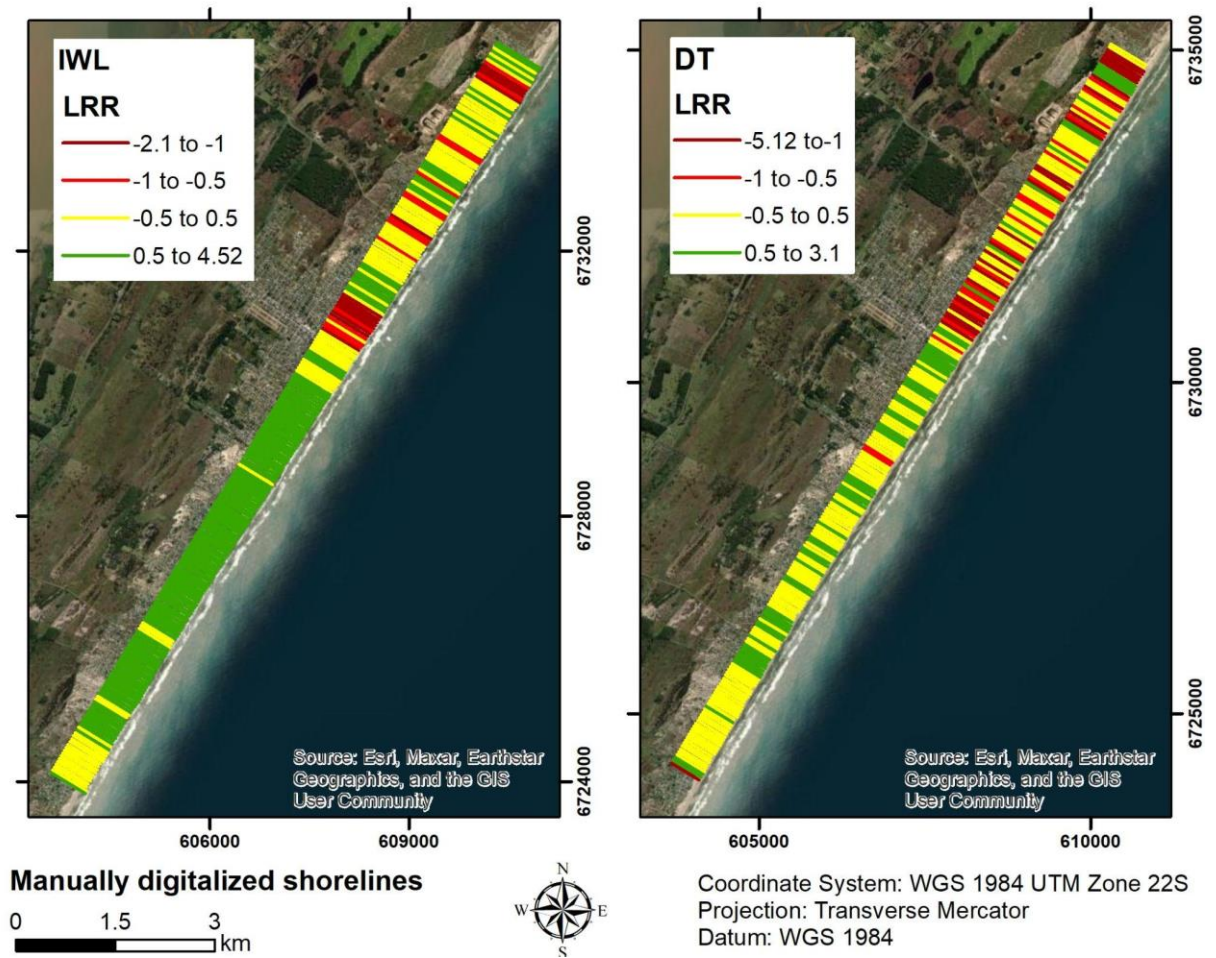


Figure 4.7: Shoreline change rates, in meters per year, using manually digitalized shorelines. On the left the results use the instantaneous waterline as a proxy, in the right the dune toe. The color scheme represents the trend of displacement, with hot tones indicating erosion and green tones representing accretion. Imagery source: Esri

4.3.4. Uncertainty assessment

The characteristics of aerial photos and the errors involved in calculating the shoreline changes for the manually digitalized analyses are displayed in Table 4.5. The cumulative uncertainty in the position of the coastline is the result of the sum of three components (i) digitization error (R), represented by the resolution of the image; (ii) georeferencing error (G), represented by the RMSE; (iii) and a physical component of the error (D), related to the specific characteristics of each coastline proxy (Del Río and Garcia, 2013).

According to Del Río and Garcia (2013), the uncertainty provoked by tide oscillation (D factor) can be calculated through the equation, $D = M \tan \beta$, where M is the difference between maximum spring tide and neap tide, and $\tan \beta$ is the slope of the beach. According to Andrade et al. (2018), the astronomical on the RS coast is

semidiurnal, with average values of 0.31 m and a maximum amplitude of 0.53 m in spring. The beach slope at Arroio do Sal is 0.057° (Dillenburg et al., 2000), which gives an uncertainty of 3.86 m.

Table 4.5: Estimated shoreline position uncertainties to the manual shoreline dates used. R = Scanning error (pixel size); G = georeferencing error (RMSE); D = Physical component specific to shoreline proxy uncertainty; Ep = total uncertainty

	<i>Instantaneous waterline (IWL)</i>				<i>Dune Toe (DT)</i>			
	R	G	D	Ep	R	G	Ep	
1948	2.604		3.860	4.656	2.604		2.604	
2012	0.463	0.108	3.860	3.889	0.463	0.108	0.475	
2013	0.457	0.127	3.860	3.889	0.457	0.127	0.474	
2016	0.457	0.121	3.860	3.888	0.457	0.121	0.473	
2017	0.476	0.110	3.860	3.890	0.476	0.110	0.488	
2018	0.457	0.137	3.860	3.889	0.457	0.137	0.477	
2020	0.457	0.155	3.860	3.890	0.457	0.155	0.482	
2022	0.442	0.234	3.860	3.892	0.442	0.234	0.500	
2023	0.452	0.308	3.860	3.898	0.452	0.308	0.546	
Total uncertainty				11.95				2.95
Total uncertainty by year				0.187				0.05

The total uncertainty for the instantaneous waterline is 11.95 or 0.187 m/year, considering the time interval between photos (64 years). The RMSE for 1948 is unknown and has therefore been left blank, but if an error of 5 m were considered, the total uncertainty value would increase by 1 m, reaching 12.95 m. The total uncertainty for the dune toe proxy is significantly lower (2.95) than from the IWL. This occurs because the D factor is considered zero where the dune foot is employed as a shoreline proxy due to the relative independence of this indicator from both short-term variability and relief displacement errors (Del Río and Garcia, 2013).

4.4. Discussion

The main advantage of automatic shoreline extraction is the increase in spatiotemporal resolution in many areas with little long-term monitoring. The automation of the process has allowed for a general representation of beach variability on several beaches with scarce data (Abdul-Kareem et al., 2022; Bhagya et al., 2022; Billet et al., 2023; Gunasinghe et al., 2022; Loayza et al., 2023; Nidhinarangkoon et al., 2023; Taveneau et al., 2021; Valderrama-Landeros et al., 2022). However, studies comparing the accuracy of different extraction methods are still scarce.

Castro (2022), comparing the efficiency of CASSIE and CoastSat in the extraction of shorelines on a Portuguese beach, states that both methods could acquire lines in sub-pixel resolution, but CoastSat was more accurate. In addition, the author states that Cassie is more intuitive and quicker to use due to its interface, while CoastSat requires prior study of the programming codes. Pucino et al. (2022) compared the accuracy of different methods in extracting shorelines from Sentinel imagery along the Victorian coast, Australia, and found that CoastSat has a lower overall accuracy than the Water Index (WI) extractor. In addition, CoastSat and NDWI are the least stable methods in both embayed and open-ocean environments. Vos et al. (2023) compared the accuracy of five SDS (satellite-derived shorelines) algorithms, including CoastSat and Cassie, in extracting time series of shoreline changes from Landsat satellite images and found that, although there is a variety in the individual performance of algorithms in different locations, there is no one algorithm that is more accurate than all the others in all situations.

The present study compared two shoreline extraction techniques, CoastSat and Cassie. Shorelines differ between methods both in their position and shape. CoastSat has a general displacement towards the land. In contrast, Cassie is shifted towards the sea (Fig. 4.4). Regarding the shape, Cassie has a more wavy form and a higher number of indentations, with more exaggerated features. CoastSat has a more rectilinear line, with softer indentations next to the washouts (Fig. 4.3). The same pattern is reported by Castro (2022) on São João da Caparica beach in Portugal.

The values of RMSE obtained in this study are 8.89 m for CoastSat and 27.27 m for Cassie. Those values agree with the literature. The reported accuracy of CoastSat ranges from 1.7 to 29 m (Bhagya et al., 2022; Castelle et al. 2021, 2022; Castro, 2022; Gunasinghe et al., 2022; Murray et al., 2023; Pucino et al.; 2022; Ramesh et al., 2023; Valderrama-Landeros et al., 2022; Vos et al., 2019, 2023; Zollini et al., 2023). Conversely, Cassie is reported as 7.97 to 48.3 m (Almeida et al., 2021; Castro, 2022; Vos et al., 2023). Despite being in the acceptable range, the value obtained results from a single shoreline comparison due to the limited availability of in situ data. The accuracy assessment using field data with a longer validation period could modify the values found here, increasing or decreasing the accuracy of each method.

Factors that affect shoreline extraction and lead to errors include pixel brightness, the presence of whitewater, water level fluctuations, water turbidity,

georeferencing of the satellite images, image resolution, and the interpolation and waterline-detection method (Pardo-Pascual et al., 2018; Do et al., 2018; Vos et al., 2023). Additionally, Pardo-Pascual et al. (2018) affirms that near-infrared bands are more sensitive to whitewater than short-wave infrared bands. Since Cassie uses the Normalized Difference Water Index (NDWI), which computes the SR reflectance of the pixel in the near-infrared band, whereas CoastSat uses the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), which calculates pixel brightness in the short-wave band, one of the causes of the lower accuracy of Cassie can be related to the whitewater classification.

Another difference between both methods is that CoastSat accounts for tide influence in each transect of the area. In the region of study, the tide is not a major driver, with tidal levels lower than 0.5 m. However, in meso and macrotidal coasts, the correction can be useful and deliver different results. Vos et al. (2023), comparing extractor methods on beaches with different tidal regimes, found that all five methods analyzed could accurately estimate the long-term trend on microtidal beaches. However, on a mesotidal beach, Cassie overestimated the positive trend, while CoastSat captured a slightly positive trend; on a macrotidal beach, Cassie was the only method that was able to consistently estimate a positive trend, although it both overestimated and underestimated the magnitudes. Castelle et al. (2021), applying CoastSat to meso- and macrotidal beaches, found that the accuracy of SDS deteriorates considerably in these locations due to breaking waves that affect the total water level on the coast, moistening and darkening the sand, leading the algorithm to capture the dry/wet sand interface instead of the dry sand/water boundary.

Despite the variances in shoreline position between the algorithms, the analyses of change rates have similar trends (Tab. 4). The assessments using only Landsat lines have the same mean (0.07 m) and uncertainty (0.04 m) in the two methods, with little difference in the classification of a few transects (Fig. 4.5). For Sentinel lines, both algorithms establish an erosion trend, but with different magnitudes. Moreover, there is an inequality in the classification and distribution of erosional transects; CoastSat has a greater number of critically eroded (Fig. 4.5), while Cassie has a more diverse classification along the area, which explains the higher uncertainty (Fig. 4.6). The difference in trend between the satellites is a result of their time scale. As stated by Crowell et al. (1993), longer temporal scales help to separate short-term fluctuations

(noise) from long-term trends (signal). Therefore, the results obtained with Sentinel (erosion) can be considered noise in a longer trend (stable).

According to Do et al. (2018), the use of satellite imagery to observe shoreline changes appears to work better over longer periods (more than 20 years), as a longer time scale allows averaging of short-term variability in shoreline position, leading to more reliable results and improving the signal-to-noise ratio. This is evident when we combine the Landsat and Sentinel lines in the evaluation (Fig. 4.6). In this scenario, the erosion class decreases and the accretion increases. The Sentinel results, however, although they can be considered noise in the long-term trend, are relevant to the region's dynamics, showing the coast's adjustment to highly energetic events, which is crucial for coastal management and planning. Therefore, depending on the study's objective, this information should not be ignored or diluted over a longer time scale.

A manually digitalized shoreline assessment was performed to validate the shoreline trend in Arroio do Sal. The result shows a mean LRR rate of 0.42 m, which is still in the stable class (Tab. 4.4). However, unlike all other analyses, there is an increase in the number of accretional transects (Fig. 4.5), which can be linked to the longer period, since the consideration of the shoreline from 1948, allowed the analysis of the long-term changes (>60y) (Crowell et al., 1993). However, the scenario changes when the shoreline indicator is modified. Using the same images but with a dune toe proxy rather than the instantaneous waterline, the mean LRR rate decreases to 0.04 m, and the proportion of stable to accretional transects is switched. The higher uncertainty related to the tidal oscillations appears to overestimate accretion in some parts of the study area.

Despite the difference in the number of accretional transects, both analyses show a concentration of erosion in the upper part and accretion/stability in the lower region (Fig. 4.7). The pattern coincides with the development distribution in the municipality. According to Strohaecker et al. (2014), the northern sector of the coast is more developed, with a narrower frontal dune system. In contrast, the southern part is less densely populated, with more vegetated dunes. The presence of dunes and a wider post-beach area works as a buffer, protecting the region.

4.5. Conclusions

The study presents a detailed comparative analysis of the CoastSat and Cassie algorithms in monitoring the shoreline dynamics of the Arroio do Sal. CoastSat and Cassie exhibited distinct behaviors in coastline displacement and morphology: CoastSat lines predominantly shifted landward, maintaining a rectilinear configuration. At the same time, Cassie showed a seaward shift with a more undulating form and numerous indentations. Validation of the 2013 shoreline with a GPS field survey showed an RMSE of 8.89 m for CoastSat and 27.27 m for Cassie. Despite these positional disparities, both algorithms successfully estimated the shoreline change trends at Arroio do Sal, producing comparable shoreline change rates. Our study showed that both algorithms can help assess regions where long-term monitoring data is scarce.

The results also highlight the importance of the time scale. The use of shorter periods can display a fluctuation in a longer trend. For instance, the use of a smaller period at Arroio do Sal, provided by the Sentinel images, shows erosion in most transects (-1.36 m/y for Cassie and -2.42 m/y for Sentinel), which demonstrates the adjustment of the coast to highly energetic events over the last decade. In contrast, a longer-term analysis using Landsat data reveals a stable pattern (0.07 m/y for both). The user must be aware of these implications when defining their goals. If the aim is to assess the effectiveness of beach protection measures, for example, Sentinel data may be more suitable for this purpose. On the other hand, if the objective is spatial planning, Landsat data provides more information on the behavior of the barrier over time.

Each method has its distinct advantages. Although Cassie is less accurate, it is easier to use and does not require programming knowledge, making it accessible to coastal managers and policymakers. Its web platform is user-friendly, and it includes pre-performed LRR statistical analysis, eliminating the need for GIS software. On the other hand, CoastSat offers more precise data and allows for tide correction analysis, with validation possible in areas with sufficient in situ data. It also enables the download of time-series of shoreline position along shore-normal transects and the retrieval of georeferenced images with an average RMSE of 5 m, which can be used to extract shorelines, reducing horizontal position errors manually.

The coastline of the Arroio do Sal is characterized by its stability, with change rates ranging from -0.5 to 0.5 m. Stable beaches maintain their position throughout

time and recover relatively fast to erosional events without major interventions. However, it is crucial to recognize that the position of the coastline results from a delicate balance between socioeconomic development and the preservation of natural systems. Disruptions to this balance could affect shoreline change rates and compromise stability. Furthermore, with the expected rising sea level, the coastline will have to shift towards a new equilibrium in the next decades. These factors must be integral to contemporary and future coastal planning strategies.

Acknowledgments: The authors acknowledge CECO, and UFRGS.

Funding: This study was supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Brazil.

References

- ABDUL-KAREEM, R., ASARE, N.K., ANGNUURENG, D.B. and EMMANUEL K. BREMPONG. (2022). Shoreline Variability of a Bay Beach: The Case of Apam Beach, Ghana. *Estuaries and Coasts*, v.45, p. 2373-2386. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01110-9>.
- ALBUQUERQUE, M. D. G., LEAL ALVES, D. C., ESPINOZA, J. M. D. A., OLIVEIRA, U. R., and SIMÕES, R. S. (2018). Determining shoreline response to meteo-oceanographic events using remote sensing and unmanned aerial vehicle (UAV): a case study in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v.85, p. 766-770. <https://doi.org/10.2112/SI85-154.1>.
- ALMEIDA, L. P., OLIVEIRA, I. E., LYRA, R., DAZZI, R. L. S., MARTINS, V. G., and KLEIN, A. H. F. (2021). Coastal analyst system from space imagery engine (CASSIE): shoreline management module. *Environmental Modelling and Software*, v. 140, 105033. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105033>.
- ANDERS, F. J., and BYRNES, M. R. (1991). Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59(1), 17-26.
- ANDRADE, M.M., TOLDO, E.E., NUNES, J.C.R., (2018). Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil. *Braz. J. Oceanogr.* 66 (3), 245–254. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592018017406603>.
- BARBOZA, E.G. and ROSA, M.L.C.C. (2014). Indicadores geológicos e geomorfológicos de setores em erosão na costa do Rio Grande do Sul. In: GOSO, C. Nuevas miradas a la Problemática de los ambientes costeros. DIRAC Facultad de Ciencias, v. 1, p. 83-98. <https://doi.org/10.13140/2.1.4628.9602>.
- BARBOZA, E.G., DILLENBURG, S.R., RITTER, M.N., ANGULO, R.J., BIANCINI DA SILVA, A., ROSA, M.L.C.C., CARON, F., SOUZA, M.C., 2021. Holocene sea-level changes in Southern Brazil based on high-resolution radar stratigraphy. *Geosciences*, 11(8), 326. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080326>
- BHAGYA, K. A. L., GUNASINGHE, G. P., and DINUSHA, K. A. (2022). Shoreline Change Detection Based on the Monsoon Seasonality by Means of ‘Coastsat’ Toolkit. In: KDU IRC, 2022, Dehiwala-Mount Lavinia, Proceedings... Dehiwala-Mount Lavinia: FBESS, 29, p. 244-250. <http://ir.kdu.ac.lk/handle/345/6166>.

- BILLET, C., BACINO, G., ALONSO, G., and DRAGANI, W. (2023). Shoreline Temporal Variability Inferred from Satellite Images at Mar del Plata, Argentina. *Water*, 15(7), 1299. <https://doi.org/10.3390/w15071299>.
- BOAK, E. H., and TURNER, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. DOI: 10.2112/03-0071.1.
- CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M and KLEIN, A.H.F. (1998). Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in Southern Brazil – Rio Grande to Chuí. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70, p.231-247.
- CASTELLE, B., MASSELINK, G., SCOTT, T., STOKES, C., KONSTANTINOU, A., MARIEU, V., and BUJAN, S. (2021). Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology*, 383, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107707>
- CASTELLE, B., RITZ, A., MARIEU, V., LERMA, A. N., and VANDENHOVE, M. (2022). Primary drivers of multidecadal spatial and temporal patterns of shoreline change derived from optical satellite imagery. *Geomorphology*, 413, 108360. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108360>
- CASTRO, P. M. N. (2022). Mapeamento e evolução da área útil de praias em imagens de satélite. (Doctoral dissertation). Retrieved from Repositório da Universidade de Lisboa (<http://hdl.handle.net/10451/59283>).
- CROWELL, M., LEATHERMAN, S. P., and BUCKLEY, M. K. (1993). Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, v. 61, n. 2, p. 13-20.
- CROWELL, M., LEATHERMAN, S. P., and DOUGLAS, B. (2019). Erosion: Historical analysis and forecasting. *Encyclopedia of Coastal Science*. In: Finkl, C., Makowski, C. (Eds), *Encyclopedia of Coastal Science*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. pp. 792-798. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_138
- CUROY, J., WARD, R. D., BARLOW, J., MOSES, C., and NAKHAPAKORN, K. (2022). Coastal dynamism in Southern Thailand: An application of the CoastSat toolkit. *Plos one*, 17(8), e0272977. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272977>
- DEL RÍO, L., and GRACIA, F. J. (2013). Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural hazards*, 65, 2385-2397. DOI 10.1007/s11069-012-0407-y.
- DILLENBURG, S. R., ROY, P. S., COWELL, P. J., and TOMAZELLI, L. J. (2000). Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). *Journal of Coastal Research*, 71-81. <http://www.jstor.org/stable/4300012> .
- DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E.G.; TOMAZELLI, L.J.; HESP, P.A.; CLEROT, L.C.P. and AYUP-ZOUAIN, R.N. (2009). The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A, *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Lecture notes in Earth Sciences, v. 107. Springer, Berlin, p. 53-91. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_3.
- DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E.G., HESP, P.A., ROSA, M.L.C.C., CARON, F., GUDAGNIN, F. 2024. The progradational Curumim barrier in southern Brazil: An archive of sea-level changes, and cyclic aeolian activity in the Holocene. *Geomorphology*, 448, 109028. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109028>
- DO, A. T., VRIES, S. D., and STIVE, M. J. (2019). The estimation and evaluation of shoreline locations, shoreline-change rates, and coastal volume changes derived from Landsat images. *Journal of Coastal Research*, 35(1), 56-71. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-18-00021.1

- ESTEVEES, L. S., and FINKL, C. W. (1998). The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. *Journal of Coastal Research*, 11-18. <http://www.jstor.org/stable/25736114>
- FIGUEIREDO, S.A. and CALLIARI, L.J. (2005). Sangradouros: Distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. *Gravel*, v. 3, p. 47-57.
- FRANCO, B. J. (2021). Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região Metropolitana de Fortaleza. (Master's thesis). Retrieved from Repositório da Universidade Federal do Ceará (<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/59257>).
- GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., and MOORE, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- GUNASINGHE, G. P., RATNAYAKE, N. P., RATNAYAKE, A. S., SAMARADIVAKARA, G. V. I., DUSHYANTHA, N. P., JAYARATNE, R., DINUSHA, K.A. and SILVA, A. (2022). Monsoon-driven geomorphological changes along the West coast of Sri Lanka: a combined approach utilizing 'CoastSat' and Google Earth engine. *Ocean Science Journal*, 57(3), 475-492. <https://doi.org/10.1007/s12601-022-00081-z>.
- HIMMELSTOSS, E. A., HENDERSON, R. E., KRATZMANN, M. G., and FARRIS, A. S. (2018). Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide, No. 2018-1179. US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2023). Censo Demográfico 2022, População e domicílios - Primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.
- KOERICH, M. P., and DE SOUZA PEREIRA, P. (2023). Assessing the impacts of coastal engineering structures on the coastline of Santa Catarina state, southern Brazil: A geospatial approach. *Ocean and Coastal Management*, 245, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106858>.
- KONSTANTINO, A., SCOTT, T., MASSELINK, G., STOKES, K., CONLEY, D., and CASTELLE, B. (2023). Satellite-based shoreline detection along high-energy macrotidal coasts and influence of beach state. *Marine Geology*, 107082. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107082>
- LINS, L. (2022). Processos erosivos na região costeira do município de Fortim, Ceará – Brasil. (Bachelor's thesis). Retrieved from Repositório da Universidade de Brasília (<https://bdm.unb.br/handle/10483/32640>).
- LOAYZA, J. S., OÑA, A. B., BUSTAMANTE, C. M., and VILLACÍS, E. E. (2023). Dinámica Costera en la Isla Puná del Golfo de Guayaquil, a partir de imágenes satelitales y SIG, periodo 2003-2021. *Revista Acta Oceanográfica del Pacífico*, 5(1), 33-55. <https://doi.org/10.54140/raop.v5i2.65>.
- LUIJENDIJK, A., HAGENAARS, G., RANASINGHE, R., BAART, F., DONCHYTS, G., & AARNINKHOF, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific reports*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MCGILL, S. P., HARRIS, B. D., MCFALL, B. C., KRAFFT, D. R., BAIN, R. L., OLSEN, N. R., CONERY, I.W., and CHASTEN, M. A. (2022). Morphological Analysis of a Nearshore Nourishment along the Atlantic Coast of New Jersey, USA. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1622. <https://doi.org/10.3390/jmse10111622>
- MOTTA, L. M., TOLDO, E. E., DE SÁ, L. E., DE ALMEIDA, B., and NUNES, J. C. (2015). Sandy sediment budget of the midcoast of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Marine Research*, 73(3), p. 49-69. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/404

- MOTTA, V. (1969). Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra de Rio Grande. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 144p.
- MURRAY, J., ADAM, E., WOODBORNE, S., MILLER, D., XULU, S., and EVANS, M. (2023). Monitoring shoreline changes along the southwestern coast of South Africa from 1937 to 2020 using varied remote sensing data and approaches. *Remote Sensing*, 15(2), 317. <https://doi.org/10.3390/rs15020317>.
- NIDHINARANGKOON, P., RITPHRING, S., KINO, K., and OKI, T. (2023). Shoreline Changes from Erosion and Sea Level Rise with Coastal Management in Phuket, Thailand. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 969. <https://doi.org/10.3390/jmse11050969>
- OLIVEIRA, U. R., SIMÕES, R. S., CALLIARI, L. J., and GAUTÉRIO, B. C. (2019). Erosão de dunas sob ação de um evento extremo de alta energia de ondas na costa central e sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 1, p. 137-158. 137–158. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1352>.
- OSAKO, L. S., and JUNIOR, J. O. (2023). Análise da variação da linha de costa com uso da ferramenta Cassie: um estudo de caso no arco praias barra da lagoa–Moçambique em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. *Entorno Geográfico*, (26), e22713087-e22713087. DOI: 10.25100/eg.v0i26.13087.
- PALOMAR-VÁZQUEZ, J., PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., and CABEZAS-RABADÁN, C. (2023). Shoreline Analysis and Extraction Tool (SAET): a new tool for the automatic extraction of satellite-derived shorelines with subpixel accuracy. *Remote Sensing*, 15(12), 3198. <https://doi.org/10.3390/rs15123198>.
- PARDO-PASCUAL, J. E., SÁNCHEZ-GARCÍA, E., ALMONACID-CABALLER, J., PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M., SANTOS, E.P., FERNÁNDEZ-SARRÍA, A., and BALAGUER-BESER, Á. (2018). Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 326. Doi: 10.3390/rs10020326.
- PUCINO, N., KENNEDY, D. M., YOUNG, M., and IERODIACONOU, D. (2022). Assessing the accuracy of Sentinel-2 instantaneous subpixel shorelines using synchronous UAV ground truth surveys. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113293. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113293>.
- RAMESH, M., KRISHNA, P. S., RAJ, V. A., and NAIR, L. S. (2023). Coupled coastal monitoring framework for the analysis of beach stability and nearshore hydrodynamics of a structure influenced medium energy coast in India. *Ocean and Coastal Management*, 239, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106619>
- ROCHA, C.M., BARBOZA, E.G., NIENCHESKI, L.F.H., (2018). Radon activity and submarine groundwater discharge in different geological regions of a coastal barrier in Southern Brazil. *Environ. Earth Sci.* 77, 527. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7711-0>.
- ROSA, M. L. C. D. C.; BARBOZA, E. G.; ABREU, V. D. S.; TOMAZELLI, L. J. and DILLENBURG, S. R. (2017). High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, v. 47, n. 2, p. 183-207, DOI: 10.1590/2317-4889201720160138
- RIO GRANDE DO SUL, R.S. (2020). Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul. 5ª ed., Porto Alegre, Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 205p.
- SAAD, R., GERARD, J. A., and GERARD, P. (2021). Detection of the shoreline changes using DSAS technique and remote sensing: a case study of Tyre Southern Lebanon. *Journal of Oceanography and Marine Research*, v. 9, l. 11, n. 1000004, p. 1-18.

SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M., PARDO-PASCUAL, J. E., ALMONACID-CABALLER, J., CABEZAS-RABADÁN, C., and GÓMEZ-PUJOL, L. (2020). An efficient protocol for accurate and massive shoreline definition from mid-resolution satellite imagery. *Coastal Engineering*, 160, 103732. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103732>.

STROHAECKER, T., GRUBER, N., TABAJARA, L., PORTZ, L., FRANCHINI, R., OLIVEIRA, R., PEREIRA, F., MANZOLLI, R., CAETANO, F., ZASSO, L., OLIVEIRA, J. and SILVA, L. (2014). Plano de manejo de dunas de Arroio do Sal (Rio Grande do Sul): indicadores de vulnerabilidade à erosão e propostas de manejo ambiental e territorial. In: GOSO, C. (Ed.), *Nuevas miradas a la Problemática de los ambientes costeros*, vol. 1. DIRAC Facultad de Ciencias, chap. 2, pp. 27–49.

TAVENEAU, A., ALMAR, R., BERGSMA, E. W., SY, B. A., NDOUR, A., SADIO, M., and GARLAN, T. (2021). Observing and predicting coastal erosion at the Langue de Barbarie sand spit around Saint Louis (Senegal, West Africa) through satellite-derived digital elevation model and shoreline. *Remote Sensing*, 13(13), 2454. <https://doi.org/10.3390/rs13132454>

TOLDO JR, E. E., and ALMEIDA, L. E. S. B. (2003). A Linha de água como Indicadora da Posição da Linha de Praia. In: IX CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 2003, Recife. Anais... ABEQUA, Recife.

TOMAZELLI, L.J. and VILLWOCK, J.A. (2000). O Cenozóico do Rio Grande do Sul: Geologia da planície costeira. In: HOLZ, M and DeROS, L.F. *Geologia do Rio Grande do Sul*. Edição CECO/UFRGS, Porto Alegre, p.375-406.

TSIAKOS, C. A. D., and CHALKIAS, C. (2023). Use of Machine Learning and Remote Sensing Techniques for Shoreline Monitoring: A Review of Recent Literature. *Applied Sciences*, 13(5), 3268. <https://doi.org/10.3390/app13053268>

VALDERRAMA-LANDEROS, L., FLORES-VERDUGO, F., and FLORES-DE-SANTIAGO, F. (2022). Assessing the coastal vulnerability by combining field surveys and the analytical potential of CoastSat in a highly impacted tourist destination. *Geographies*, 2(4), 642-656. <https://doi.org/10.3390/geographies2040039>

VIANNA, H. D., CALLIARI, L. J., and VIANNA, S. D. (2020). Inundação e erosão na costa norte do Rio Grande do Sul-Brasil. Estudo de caso: a maré meteorológica de outubro de 2016. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, V. 21, n. 4, p. 719-739. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1749>.

VILLWOCK, J.A. and TOMAZELLI, L.J. (1995). *Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas*, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, v.8, p. 1-45.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J.; LOSS, E.L.; DEHNHARDT, E.A.; HORN, N.O.; BACHI, FL.A. and DEHNHARDT, B.A. (1986). Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: RABASSA, J. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, A.A. Balkema, Rotterdam, v.4, p.79-97. GO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406. <https://doi.org/10.1201/9781003079316-5>.

VITOUSEK, S., BUSCOMBE, D., VOS, K., BARNARD, P. L., RITCHIE, A. C., and WARRICK, J. A. (2023). The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e10. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>.

VOS, K., SPLINTER, K. D., HARLEY, M. D., SIMMONS, J. A., and TURNER, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.

VOS, K., HARLEY, M. D., SPLINTER, K. D., WALKER, A., and TURNER, I. L. (2020). Beach slopes from satellite-derived shorelines. *Geophysical Research Letters*, 47(14), e2020GL088365. [10.1029/2020GL088365](https://doi.org/10.1029/2020GL088365).

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.F., MAO, Y., HARRIS, D., CASTELLE, B., BUSCOMBE, D. and VITOUSEK, S. (2023). Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms. *Communications Earth and Environment*, 4(1), 345. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2>.

WESCHENFELDER, J. (1996). Variabilidade Morfodinâmica das Praias Oceânicas entre Imbé e Arroio do Sal, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. (Master's thesis). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 125 p.

WESCHENFELDER, J., and ZOUAIN, R. A. (2002). Variabilidade morfodinâmica das praias oceânicas entre Imbé e Arroio do Sal, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 29(1), 3-13. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.19593>

ZOLLINI, S., DOMINICI, D., ALICANDRO, M., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., ANGELATS, E., RIBAS, F., and SIMARRO, G. (2023). New Methodology for Shoreline Extraction Using Optical and Radar (SAR) Satellite Imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 627. <https://doi.org/10.3390/jmse11030627>

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo foi pautado pelo seu principal objetivo, que era testar a hipótese de que a variabilidade da permeabilidade praial, ocasionada pela evolução geológica da barreira holocênica do RS, é significativa para influenciar no deslocamento da linha de costa em curta escala de tempo e afetar o perfil morfológico da praia frente aos eventos extremos de alta energia. Além disso, o deslocamento da linha de costa nas áreas de estudo foi corroborado a partir de diferentes tecnologias, incluindo GPR (*Ground Penetrating Radar*), UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), e os algoritmos CoastSat e Cassie.

Os resultados permitiram constatar que a presença e a profundidade de uma camada de turfa não influenciam o coeficiente de permeabilidade, e que não há correlação entre a permeabilidade e o deslocamento atual da linha de costa, refutando a hipótese inicial. Essa constatação é demonstrada pelas análises estatísticas, que mostram valores muito próximos de permeabilidade entre todas as áreas de estudo (Figs. 5.5 e 5.9). O trecho entre a Praia das Cabras e o Jardim do Éden, apesar de ser caracterizado como com linha de costa transgressiva (Figs. 3.7 e 5.2) e estar sofrendo erosão em escala histórica (Figs. 3.8, 5.4) apresentou valores de permeabilidade semelhantes ao de Arroio do Sal, que possui uma linha de costa regressiva (Fig. 5.3) e estável (Figs. 4.5, 4.6 e 4.7).

Outra constatação levantada é a de que a variabilidade da permeabilidade é explicada em parte (27%) pelo tamanho dos grãos (Tabs. 5.10 e 5.11), sendo outros fatores determinantes ainda desconhecidos. O índice de vazios entre grãos, no entanto, parece ser um fator-chave, sendo reconhecido na literatura atual. A distribuição espacial do coeficiente de permeabilidade em uma mesma praia dá suporte à importância do arranjo das partículas, já que trechos distintos da praia apresentaram valores significativamente menores (Figs. 5.7 e 5.8, Tab. 5.8). Os trechos onde ocorre o tráfego de veículos, em todas as praias analisadas, apresentaram valores significativamente menores de permeabilidade comparado ao berma.

De maneira geral, o uso de diferentes geotecnologias (GPR, UAV, Cassie, CoastSat, *VosViewer*, *Altmetrics Bookmarklet*, e *Tree of Science*) ao longo dos capítulos permitiu caracterizar o comportamento da linha de costa em cada região e o estado da arte atual. A revisão bibliográfica realizada, inicialmente mostrou a evolução

e o enquadramento da permeabilidade nos estudos costeiros (Figs. 2.7 e 2.8), possibilitando a identificação de tendências e de lacunas, sendo uma das principais lacunas a falta de medições da permeabilidade *in situ*. O presente estudo ajuda a suprir essa demanda, fornecendo esses dados medidos em campo. Os dados de permeabilidade obtidos nesse trabalho podem trazer diferentes benefícios às diversas áreas de conhecimento, incluindo a validação em modelos numéricos de fluxo, e o aprimoramento de fórmulas para estimar a permeabilidade.

A integração entre os métodos de investigação de superfície (drone) e de subsuperfície (GPR) apresentados no Capítulo III se mostraram imprescindíveis para definir tanto a presença da turfa como da arquitetura deposicional da barreira, quanto para caracterizar o deslocamento da linha de costa e o padrão de empilhamento estratigráfico na Praia das Cabras. O GPR foi empregado pela primeira vez nesta Praia, permitindo interpretar a barreira com padrão de empilhamento estratigráfico retrogradacional nesse ponto (Fig. 3.7). O uso das técnicas de extração automática da linha de costa, apresentada no Capítulo IV, ajudou tanto a definir o comportamento da linha de costa em Arroio do Sal nas últimas quatro décadas (Figs. 4.5 e 4.6), quanto a comparar a precisão de diferentes algoritmos na região, fornecendo dados de acurácia (Fig. 4.4) que auxiliam na calibração e na escolha do algoritmo a ser aplicado em pesquisas futuras.

Finalmente, os resultados obtidos permitiram ampliar o conhecimento acerca da permeabilidade na praia, compreendendo seu enquadramento no quadro atual das pesquisas costeiras, e as relações com o padrão de empilhamento estratigráfico na costa do RS. As análises estatísticas realizadas demonstraram que não existe correlação entre a presença da turfa e o coeficiente de permeabilidade e que, portanto, a permeabilidade não é o elo que liga a erosão em diferentes escalas temporais, como sugerido anteriormente.

Futuramente, é essencial investigar a capacidade de infiltração entre as regiões com linhas de costas transgressivas e regressivas já que, apesar de não influenciar o coeficiente de permeabilidade, a turfa pode provocar a saturação do solo durante chuvas intensas e duradouras, fazendo com que o solo atinja a capacidade de infiltração mais rapidamente nos pontos onde a turfa está presente, o que pode influenciar negativamente o perfil praiar nessas regiões. Além disso, seria interessante expandir as análises estatísticas para incluir outros fatores, como por exemplo: o índice de vazios, a porosidade, a densidade e o teor de umidade. Esses dados

sedimentares, já reconhecidos em algumas fórmulas empíricas, podem melhorar o entendimento da variabilidade da permeabilidade ao longo da costa do RS. Por fim, o monitoramento temporal da permeabilidade e das forçantes oceânicas na região podem disponibilizar informações cruciais sobre a evolução sazonal do perfil praial e até mesmo sobre a resposta da praia frente aos eventos climáticos extremos com maior energia.

6. Referencias

- Austin, M. J., & Masselink, G. (2006). Infiltration and Exfiltration on a Steep Gravel Beach: Implications for Sediment Transport. *Coastal Dynamics*, 26(20), p. 2503-2519. Doi:10.1061/40855(214)102
- Barboza, E. G., & Tomazelli, L. J. (2003). Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35, 260-264. <https://www.jstor.org/stable/40928769>
- Barboza, E. G.; Dillenburg, S. R.; Ritter, M. N.; Angulo, R. J.; Biancini da Silva, A.; Rosa, M. L. C. C.; Caron, F.; & Souza, M. C. (2021). Holocene Sea-Level Changes in Southern Brazil Based on High-Resolution Radar Stratigraphy. *Geosciences (Switzerland)*, 11(8), 326. DOI: 10.3390/geosciences11080326
- Bagnold, R. A. (1940). Beach formation by waves: some model experiments in a wave tank (includes photographs). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 15(1), p. 27-52.
- Baird, A. J., & Horn, D. P. (1996). Monitoring and modelling groundwater behaviour in sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, p. 630-640. <https://www.jstor.org/stable/4298511>
- Beard, D. C., & Weyl, P. K. (1973). Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand. *AAPG bulletin*, 57(2), p. 349-369.
- Bennett, R. H., Hulbert, M. H., Curry, C., Johnson, H. P., Hutnak, M. & Curry, K. J. (2002). In situ permeabilities of selected coastal marine sediments. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(3), p. 571-580. <https://doi.org/10.1109/JOE.2002.1040939>
- Beyer, W. (1964). On the determination of hydraulic conductivity of gravels and sands from grain-size distributions. *Wasserwirtschaft-wassertechnik*, 14(6), p. 165-169.
- Bicalho, K. V., Machado, S. L., & Gerscovich, D. M. (2015). Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In Carvalho, JC, Gitirana, G, Machado, S, Mascarenha, M.M.A, and Silva Filho, F.C. (Org.). *Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia, São Paulo, 1st Ed, p. 403-438. <https://doi.org/10.4322/978-65-992098-3-3.cap13>
- Bose, M. A., Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., Arigony-Neto, J., Goulart, E. S., Ferreira, J. A.C., & Albuquerque, M.G. (2020). Os efeitos da elevação do nível do mar e do balanço sedimentar em um hotspot erosivo no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 47(2), <https://doi.org/10.22456/1807-9806.108560>.
- Butt, T., Russell, P. & Turner, I. (2001). The influence of swash infiltration–exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore? *Coastal Engineering*, 2(1), p. 35-52. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00046-6)
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC–Livros Técnicos e Científicos Editoria SA.
- Castro, A. C. L., Moreira, M. S., Silva, M. H. L., Azevedo, J. W. J., Ferreira, H. R. S., Pinheiro Júnior, J. R., Machado, A.M.B., & Soares, L. S. (2021). Morphometric characterization of Banho and Caúra beaches in the municipality of São José de Ribamar, São Luís Island, state of Maranhão, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(2), p. 1058-1069. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/247024/38695>
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian geotechnical journal*, 41(5), p. 787-795. <https://doi.org/10.1139/t04-022>

- Costa, R.C. (2020). *Ensaio de Caracterização e Permeabilidade na Areia da Praia de Ipanema, RJ. Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 258 p.
- Costi, J., & Calliari, L. J. (2008). Estimativa do volume sedimentar potencialmente contaminado em casos de derrame de óleo em condições de verão para praias arenosas do Rio Grande do Sul. In RIO OIL and GAS EXPO AND CONFERENCE, 2008, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro (8 p).
- Cunha, I.R.V., Mendes, A.C., Miranda, A.G.O., Luczynnsky, E., & Correia, K.A. (2016). Permeabilidade de uma praia fluvial amazônica a derivados de hidrocarbonetos: o caso da praia do Caripi (Pará – Brasil). In II CONGRESSO AMAZÔNICO DE MEIO AMBIENTE E ENERGIAS RENOVÁVIES, 2016, Belém. *Anais...* Belém (12 p).
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2007). *Fundamentos de engenharia geotécnica*, 7ª Ed. Cengage Learning, São Paulo.
- Davidson-Arnott, R., Bauer, B. and Houser, C. (2019). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press.
- Delleur, J. W. (Ed.). (2006). *The handbook of groundwater engineering*. CRC press.
- Dillenburg, S. R., Tomazelli, L. J., & Barboza, E. G. (2004). Barrier evolution and placer formation at Bujuru Southern Brazil. *Marine Geology*, 203(1-2), p. 43-56. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00330-X).
- Dillenburg, S.R., Esteves, L.S. & Tomazelli, L.J. (2004). A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 76, n. 3, p. 611-623. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652004000300014>
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P., & Ayup-Zouain, R.N. (2009). The Holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R., Hesp, P.A. (Eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences, vol. 107. Springer, Berlin, p. 53–91. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9_3.
- Dillenburg, S. R., Roy, P. S., Cowell, P. J., & Tomazelli, L. J. (2000). Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). *Journal of Coastal Research*, p. 71-81. <http://www.jstor.org/stable/4300012> .
- Elfrink, B. & Baldock, T. (2002). Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45(3-4), p. 149-167. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00032-7)
- Evans, M., & Warburton, J. (2011). *Geomorphology of upland peat: erosion, form and landscape change*. John Wiley and Sons.
- Felton, G. K., & Ali, M. (1992). Hydraulic parameter response to incorporated organic matter in the B-horizon. *Transactions of the ASAE*, 35(4), p. 1153-1160. DOI: 10.13031/2013.28713.
- Figueiredo, S. A. & Calliari, L.J. (2005). Sangradouros: Distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. *Gravel*, v. 3, p. 47-57.
- Figueiredo, S. A., & Calliari, L. J. (2006). Washouts in the central and northern littoral of Rio Grande do Sul state, Brazil: distribution and implications. *Journal of Coastal Research*, SI 39: p. 366-370. <https://www.jstor.org/stable/25741597>
- Gourlay, M. R. (1992). Wave set-up, wave run-up and beach water table: Interaction between surf zone hydraulics and groundwater hydraulics. *Coastal engineering*, 17(1-2), p. 93-144. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(92\)90015-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90015-M)

- Grant, U.S. (1948). Influence of the water table on beach aggradation and degradation. *Journal of Marine Research*, 7(3). https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/694
- Harleman, D.R.F., Melhorn, P.F., & R.R. Rumer. (1963). Dispersion-permeability correlation in porous media. *Journal of the Hydraulic Division*, 89(2), p. 67–85.
- Hazen, A. (1911). Discussion of “Dams on Sand Foundations” by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 73, p. 199-203.
- Hazen, A. (1892). *Some Physical Properties of Sands and Gravels, With Special Reference to Their Use in Filtration*. Massachusetts State Board of Health, 24th Annual Report, p. 539–556.
- Head, K. H., & Epps, R. J. (1982). *Manual of Soil Laboratory Testing Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*, Pentech Pres, London.
- Horn, D. P. (2002). Beach groundwater dynamics. *Geomorphology*, 48(1-3), p. 121-146. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00178-2](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00178-2)
- Horn, D. & Li, L. (2006). Measurement and modelling of gravel beach groundwater response to wave run-up: effects on beach profile changes. *Journal of Coastal Research*, 22(5), p. 1241-1249. <https://doi.org/10.2112/06A-0006.1>
- Kim, H., Anderson, S. H., Motavalli, P. P., & Gantzer, C. J. (2010). Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. *Geoderma*, 160(2), p. 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.030>.
- Klein, A. H. F., & Calliari, L. J. (1997). Praias oceânicas entre Cassino e Chuí (RS): variações da permeabilidade e sua influência no processo de troca de sedimentos. In VI CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 1997, *Anais...* Curitiba, PR.
- KOMAR, P.D. Beach processes and erosion—an introduction. (1983). In: Komar, P.D. & Moore, J.R (Eds.). *Handbook of coastal processes and erosion*. CRC Press, p. 1-20.
- Kulkarni, C.D., Levoy, F., Monfort, OI., & Miles, J. (2004). Morphological variations of a mixed sediment beachface (Teignmouth, UK). *Continental Shelf Research*, v.24, p. 1203-1218. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.005>
- Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1991). *Soil mechanics*, Vol. 10. John Wiley and Sons.
- Li, L., Barry, D.A., Pattiaratchi, C.B. & Masselink, G. (2002). BeachWin: modelling groundwater effects on swash sediment transport and beach profile changes. *Environmental Modelling and Software*, v. 17, p. 313-320. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00066-4)
- Lima, L. G., Dillenburg, S. R., Medeanic, S., Barboza, E. G., Rosa, M. L. C., Tomazelli, L. J. & Caron, F. (2013). Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 42, p. 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.07.002>
- Lima, L. G. D., Dillenburg, S. R., Buchmann, F. S. D. C., & Parise, C. K. (2020). O significado paleogeográfico das turfeiras costeiras do Rio Grande do Sul. *Revista Geociências*. Rio Claro, SP: UNESP. Vol. 39, n. 2 (2020), p. 393-410.
- Locatelli, G. O., Nunes, L. S. D. E. S., Sousa, M. D. F. V. D. Q., Lopes, C. E., & Inkler, C. L. L. (2015). Predição de um modelo de percolação de óleo diesel em praias da praia do Porto de Suape—PE, Brasil. *Revista de Geologia*, 28(1), p. 15 - 26,
- Lopes, K.S. (2016). Permeabilidade da praia do Atalaia (Salinópolis- PA) frente a eventuais derrames de derivados de hidrocarbonetos. In II CONGRESSO AMAZÔNICO DE MEIO AMBIENTE E ENERGIAS RENOVÁVIES, 2016, Belém. *Anais...* Belém (12 p).

- Lopes, M. N., Chaves, P. F., San Martins, L. V., & Vieira, H. (2007). Estudo do impacto ambiental sobre a biodiversidade da praia do Cassino causado por veículos automotores. In VIII CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 2007, *Anais...* Caxambu.
- Masselink, G. & Li, L. (2001). The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study. *Marine Geology*, 176(1-4), p. 139-156. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00161-X)
- McLachlan, A. & Turner, I. (1994). The interstitial environment of sandy beaches. *Marine Ecology*, 15(3- 4), p. 177-212. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1994.tb00053.x>
- Muehe, D. (2019). Pós-praia não deve ser traduzido como backshore—uma revisão da terminologia brasileira do sistema praia—antepraia. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 10, n. 1.
- Nielsen, P., Robert, S., Moller-Christiansen, B., & Oliva, P. (2001). Infiltration effects on sediment mobility under waves. *Coastal Engineering*, v. 42, p. 105-114. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00051-X)
- Oliva, A., Kiang, C. H., & Caetano-Chang, M. R. (2005). Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug. *Águas subterrâneas*, 19(2).
- Oliveira, A.M. (2014). *Permeabilidade de praias fluviais e estuarinas amazônicas a eventuais derrames de derivados de hidrocarbonetos: o caso das Praias Grande (Ilha de Outeiro-PA) e Caripi (Barcarena-PA)*. Trabalho de conclusão de curso (Faculdade de Oceanografia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 66 p.
- Oliveira, E. B. & Nicolodi, J. L. (2017). Oil permeability variations on lagoon sand beaches in the Patos-Guaíba system in Rio Grande do Sul, Brazil. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), p. 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.020>
- Ortigão, J. A. R. (2007) *Hidráulica de solos. Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*. 3ª edição, Terratek. Pags 98-130
- Pereira, P. S. (2005). *Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geomorfológicos* (Masther's Thesis). Retrieved from <http://repositorio.furg.br/handle/1/3498>.
- Pereira, P.S., and Calliari, L. J. (2005). Permeabilidade das praias oceânicas do Rio Grande do Sul (RS) em relação a eventuais derrames de óleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. *Anais...* Salvador.
- Pereira, P.S., Calliari, L. J., & Guedes, R. M. C. (2006). Permeabilidade das praias arenosas do Rio Grande Do Sul: reflexo da herança geológica e morfodinâmica de praias. In: X CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 2005, Guarapari, *Anais...* Guarapari: ABEQUA.
- Ramos, R.J.P. (2022). *Permeabilidade das praias oceânicas da Ilha do Maranhão frente a eventuais derrames de derivados de hidrocarbonetos*. Monografia (Graduação em Oceanografia). Universidade Federal do Maranhão, 61 p.
- Raposo, G.A.R. (2018). *Caracterização de processos erosivos nas falésias das praias de Panaquatira e Olho D'Água, Ilha do Maranhão/MA*. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual do Maranhão, 96 p.
- Rosa, M.L.C.C., Hoyal, D.C., Barboza, E.G., Fedele, J., & Abreu, V.S. (2016). River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil, in: Budd, D.A., Hajek, E.A., Purkis, S.J. (Eds.),

- Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems. SEPM Special Publication 106, 176-197. <https://doi.org/10.2110/sepmsp.106.13>
- Rosas, J., Lopez, O., Missimer, T. M., Coulibaly, K. M., Dehwah, A. H., Sesler, K., Lujan, L.R. and Mantilla, D. (2014). Determination of hydraulic conductivity from grain- size distribution for different depositional environments. *Groundwater*, 52(3), p. 399-413. <https://doi.org/10.1111/gwat.12078>
- Rosen, P. S. (1980). Erosion susceptibility of the Virginia Chesapeake Bay shoreline. *Marine Geology*, 34(1-2), p. 45-59. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(80\)90140-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(80)90140-1).
- Song, H., Xie, J., Yin, P., Fu, H., Zhang, Y., & Yan, C. (2024). The investigation of the particle shape effect on the permeability of porous media through lattice Boltzmann simulation and experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, 201, 108983. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108983>.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics* (Vol. 66, No. 2, p. 161). LWW.
- Tomazelli, L. J., & Villwock, J. A. (1991). Geologia do sistema lagunar holocênico do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 18(1), p. 13-24. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21358>
- Tomazelli, L. J., Villwock, J. A., Bachi, F. A., & Dehnhardt, B. A. (1995). A tendência atual de subida do nível relativo do mar na costa do Rio Grande do Sul: uma análise das evidências. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 6, Porto Alegre. Boletim de Resumos Expandidos... p. 281-283.
- Tomazelli, L. J., Villwock, J. A., Bachi, F. A., Dillenburg, S. R., & Dehnhardt, B. A. (1998). Significance of Present-Day Coastal Erosion and Marine Transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2), 221-229.
- Travessas, F.A., Dillenburg, S. R., & Clerot, L. C. P. (2005). Estratigrafia e evolução da barreira holocênica do Rio Grande do Sul no trecho Tramandaí-Cidreira. *Boletim Paranaense de Geociências*, 57, p. 57-73. <https://doi.org/10.5380/geo.v57i0.6043>.
- Turner, I. L. & Masselink, G. (1998). Swash infiltration- exfiltration and sediment transport. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C13), p. 30813-30824. <https://doi.org/10.1029/98JC02606>
- Vieira, H., Calliari, L., & Oliveira, G. (2004). O estudo do impacto da circulação de veículos motorizados na praia do Cassino através de parâmetros físicos. In XVIII CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 2004. *Anais...* Florianópolis.
- Watanabe, D.S.Z., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, E.G., Caron, F., Ritter, M.N., Bitencourt, V.J.B. & Manzolli, R.P. (2023). Geomorfologia e padrões de empilhamento da barreira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 1, e2223. <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2223>.

7. ANEXOS

Página de publicação do artigo 1:



Pesquisas em Geociências


Atual Arquivos Anúncios Sobre ▾

Início / Arquivos / v. 50 n. 4 (2023): Pesquisas em Geociências / ARTIGOS

Revisão sistemática dos estudos de permeabilidade em praias usando técnicas computacionais

Elaine Baroni de Oliveira

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências

 <https://orcid.org/0000-0001-8902-8867>

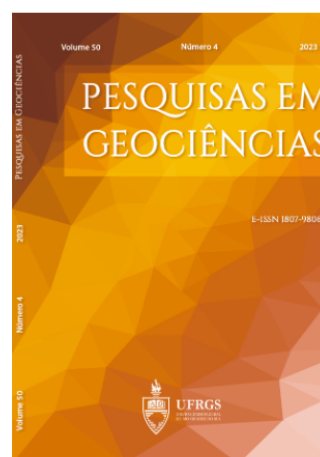
Eduardo Guimarães Barboza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica

 <https://orcid.org/0000-0003-2107-6904>

DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.136152>

Palavras-chave: Condutividade hidráulica, fluxo, morfologia costeira, VOSviewer, Tree of Science



Página de publicação do artigo 2:



Journal of South American Earth Sciences



Volume 131, November 2023, 104632



A multi-scale assessment of shoreline changes at an undeveloped beach in southern Brazil

Elaine B.de Oliveira ^{a b}  , Eduardo G. Barboza ^a

Show more ▾

+ Add to Mendeley  Share  Cite

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104632>

[Get rights and content](#) ↗

Página de publicação do artigo 3:



Remote Sensing Applications: Society and Environment




Volume 36, November 2024, 101303




Shoreline change assessment at Arroio do Sal (Southern Brazil) using different shoreline extraction methods

Elaine B. de Oliveira  , Eduardo G. Barboza


Show more 



 Add to Mendeley  Share  Cite


<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101303> 


[Get rights and content](#) 







Comprovante de submissão do artigo 4:

em Regional Studies in Marine Science Elaine Oliveira 

Home Main Menu Submit a Manuscript About  Help 

← Submissions Being Processed for Author 

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Results per page 10 

Action 	Manuscript Number 	Title 	Initial Date Submitted 	Status Date 	Current Status 
Action Links	RSMA-D-24-01126	Unveiling Coastal Dynamics: A Statistical Examination of Permeability, Stratigraphic Patterns, and Coastline Displacement Correlations	Jul 11 2024 2:35:39:410PM	Jul 29 2024 7:57:43:343AM	Under Review

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Results per page 10 