

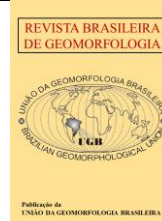


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 26, nº 4 (2025)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v26i4.2677>



Artigo de Pesquisa

Determinação da taxa de erosão costeira a partir de dados multitemporais da série Landsat na Praia da Barra, Sul de Moçambique

Determination of Coastal Erosion Rate from Multitemporal Landsat Data at Barra Beach, Southern Mozambique

Oldim Lodes Agostinho C. Vilanculo ¹, Hélder Arlindo Machaieie ²

¹ Eduardo Mondlane University (UEM), Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane, Mozambique. ochuquelane@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5991-1085>

² Eduardo Mondlane University (UEM), Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane, Mozambique. machaielder@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9461-4905>

Recebido: 19/02/2025; Aceito: 01/10/2025; Publicado: 12/11/2025

Resumo: A presente pesquisa analisou a dinâmica da linha de costa (LC) na Praia da Barra, sul de Moçambique, ao longo de 24 anos, com o objetivo de avaliar as taxas de avanço e recuo da linha costeira e identificar os fatores associados à erosão. Foram utilizadas imagens Landsat processadas no *Google Earth Engine* (GEE) para a criação de composições medianas anuais, seguidas da extração das linhas de costa e análise no *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), aplicando o método *Weighted Linear Regression Rate* (WLR). Os resultados indicaram que 65,4% dos transectos apresentaram erosão, com taxa média de recuo de -2,72 m/ano (desvio padrão de 3,18 m/ano), enquanto 34,6% evidenciaram deposição, com taxa média de avanço de 1,48 m/ano (desvio padrão de 2,57 m/ano). As maiores taxas negativas de WLR (-11,02 m/ano) ocorreram em áreas de intensa atividade turística, onde a remoção da vegetação das dunas reduziu a proteção natural contra o avanço do mar. Conclui-se que a Praia da Barra apresenta predominância de processos erosivos, com elevada variabilidade espacial, o que reforça a necessidade urgente de implementação de estratégias de mitigação que aumentem a resiliência ambiental da região.

Palavras-chave: Geomorfologia costeira, Linha de costa, Google Earth Engine, Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

Abstract: This study analyzed the shoreline dynamics of Barra Beach, southern Mozambique, over a 24-year period, aiming to assess shoreline retreat and accretion rates and identify factors associated with erosion. Landsat imagery processed in Google Earth Engine (GEE) to generate annual median composites for shoreline extraction, followed by analysis with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applying the Weighted Linear Regression Rate (WLR) method. Results showed that 65.4% of the transects experienced erosion, with an average retreat rate of -2.72 m/year (standard deviation of 3.18 m/year), while 34.6% indicated accretion, with an average advance rate of 1.48 m/year (standard deviation of 2.57 m/year). The highest negative WLR rates (-11.02 m/year) were found in areas of intense tourist expansion, where the removal of dune vegetation reduced the natural coastal protection. It is concluded that erosive processes predominantly affect Barra Beach with high spatial variability, highlighting the urgent need mitigation strategies to enhance the environmental resilience of the region.

Keywords: Coastal geomorphology, Shoreline, Google Earth Engine, Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

1. Introdução

A linha de costa, isto é, a fronteira entre a terra e o mar, muda constantemente de forma e posição devido às condições ambientais dinâmicas (Prasad; Kumar, 2014). Na sua definição clássica, a linha de costa é definida como a posição aproximada da linha de preamar média, identificada pelo traçado da linha de preamar alta (*High Water Line – HWL*), sendo o indicador mais consistente e aplicável em estudos de variação histórica da costa (Crowell; Leatherman; Buckley, 1991). Portanto, movimento da linha de costa resulta da interação entre processos marinhos e terrestres que moldam e transformam a orla costeira. Apesar de ser, em princípio, um fenômeno natural, esse movimento pode assumir caráter problemático quando a erosão costeira coloca em risco a segurança das populações, dos ecossistemas e das infraestruturas localizadas em zonas costeiras, configurando-se assim como um desafio global que afeta praticamente todos os países com litoral (Pajak; Idzikowska; Kowalczyk, 2024).

Um estudo global publicado pela Comissão Europeia, revelou que quase metade das praias arenosas do mundo pode desaparecer até o final do século devido principalmente à elevação do nível do mar, destacando também regiões onde a erosão é contrabalançada pela acumulação natural de sedimentos, como na Amazônia e em partes da Ásia Oriental e Sudeste Asiático (Vousdoukas *et al.*, 2020). Para o litoral da África oriental, que inclui países banhados pelo Oceano Índico, a elevação do nível do mar tem consequências profundas e reais. Espera-se que cause inundações de maré, inicie ou exacerbe a erosão costeira, impeça a drenagem costeira natural e aumente a intrusão salina em aquíferos de água doce e terras agrícolas essenciais (Okemwa, 1992).

O nível médio global do mar subiu de 20 a 25 cm desde 1900, com a impressionante metade desse aumento ocorrendo somente desde 1980. A taxa desse aumento também acelerou significativamente, de 1,5 mm por ano entre 1901 e 1990 para 3,6 mm por ano entre 2005 e 2015 (Oppenheimer *et al.*, 2019; IPCC, 2021). Na costa Africana, a taxa regional de elevação do nível do mar desviou-se significativamente da média global, com valores variando de 2,48 a 5,44 mm/ano entre os anos 1993 e 2022 (Pajak; Idzikowska; Kowalczyk, 2024). Para além dos efeitos combinando da elevação do nível do mar e tempestades, as atividades antropogênicas fazem com que, as mudanças constantes em forma e posição da linha de costa seja um tema tratado por diversos estudos (Fan; Xu; Wu; Lee, 2019). A remoção de barreiras naturais como manguezais, aumenta significativamente a vulnerabilidade da costa à erosão e às tempestades (Nguyen *et al.*, 2015).

A extensa costa de Moçambique, com grande relevância sociocultural e económica, enquadra-se entre as mais vulneráveis à erosão costeira devido a eventos meteoceanográficos extremos, com destaque para tempestades e ciclones tropicais, e ações humanas (Massuanganhe; Arnberg, 2008; Cabral *et al.*, 2017). A ação humana é caracterizada pela destruição da vegetação típica da zona costeira e pela construção inadequada de infraestruturas, tem acelerado o processo de erosão em algumas regiões do país (Hoguane, 2007).

Na praia da Barra, sul de Moçambique, estudos indicam que a erosão costeira tem impactado tanto o meio ambiente quanto as infraestruturas locais (Azevedo; Frei; Marques, 2013). Nesta região, a erosão é agravada pelo desmatamento da vegetação nativa sobre as dunas, causado principalmente pela expansão de empreendimentos turísticos e infraestrutura costeira, tem agravado a instabilidade do litoral (Palalane; Larson; Hanson; Juízo, 2016). Como consequência, as construções próximas à praia enfrentam riscos crescentes devido ao recuo da linha de costa, com áreas anteriormente seguras agora sujeitas a inundações. No entanto, a taxa de erosão e deposição ainda não foi investigada em detalhe, apesar de sua relevância para o planejamento do uso do solo e a prevenção de riscos costeiros.

Estudos anteriores destacaram a perda de vegetação devido à prática do turismo e ao desenvolvimento costeiro como fatores agravantes da mudança da linha de costa na praia da Barra (Azevedo, 2009; Azevedo; Frei; Marques, 2013; Palalane; Larson; Hanson; Juízo, 2016). No entanto, informações quantitativas detalhadas sobre as taxas de acréscimo e retração da linha da costa nos diferentes setores da praia a longo tempo são desconhecidas.

Pesquisas recentes destacam o uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dados de sensoriamento remoto para o mapeamento da linha costeira (Pardo-Pascual *et al.*, 2018; Bishop-Taylor; Nanson; Sagar; Lymburner, 2021; Spinosa *et al.*, 2021). A integração de plataformas de processamento de dados na nuvem, como o Google Earth Engine (GEE), com longas séries temporais de imagens de alta e média resolução, como Landsat, e ferramentas de análise da dinâmica da linha de costa, como o Digital Shoreline Analysis System (DSAS), constitui uma alternativa eficaz para o monitoramento da linha de costa (Christofi *et al.*, 2025). Contudo, a aplicação desta abordagem ainda não foi suficientemente explorada nas praias moçambicanas.

A presente pesquisa tem como objetivo analisar a dinâmica da linha de costa, avanço ou recuo, erosão e deposição, na praia da Barra ao longo de um período de 24 anos. A abordagem utilizada baseia-se na criação de imagens compostas (mediana temporal de até um ano) no Google Earth Engine, com o intuito de reduzir erros relacionados à ausência de dados sobre marés na extração das linhas de costa. Essa metodologia permite derivar uma linha de costa média, apontado por alguns autores (Almonacid-Caballer *et al.*, 2016; Sayre *et al.*, 2019; Vos *et al.*, 2019; Hu; Fan; Zhang, 2024) como sendo menos sensível a variações momentâneas de maré, vento ou condições climáticas extremas. Os resultados obtidos podem contribuir para a formulação de políticas e estratégias de gestão costeira em Moçambique. Além disso, a metodologia aplicada neste estudo pode ser replicada no monitoramento de outras praias do país, oferecendo uma base sólida para futuras investigações e ações de gestão costeira.

2. Área de Estudo

A Praia da Barra está localizada na província de Inhambane, no sul de Moçambique, aproximadamente 20 km a nordeste da cidade de Inhambane, posicionada em uma península que separa a Baía de Inhambane do Oceano Índico (Figura 1). Essa praia é um dos principais pontos turísticos e recreativos da província de Inhambane, conhecida por suas águas cristalinas, extensas faixas de dunas costeiras e abundante vida marinha, incluindo golfinhos, raias e tubarões-baleia (Fernando, 2013; Fordyce, 2018).

A região possui clima tropical húmido modificado pela altitude, caracterizado por épocas frias e muito chuvosas. A temperatura média mensal máxima é de 26,97°C e a mínima é de 20,3° C e a precipitação média anual é de 926,8mm (Zacarias, 2013). No entanto, o local é influenciado por correntes costeiras, ressacas e, ocasionalmente, ciclones tropicais, que intensificam a erosão costeira e afetam a dinâmica dos sedimentos, colocando a área em risco devido às mudanças climáticas e urbanização (Palalane; Larson; Hanson; Juízo, 2016)

A Praia da Barra caracteriza-se como um *beach break* (fundo de areia) relativamente exposto, ou seja, a formação das ondas é controlada pelo fundo raso de areia, resultando em ondulação pouco consistente. A região recebe tanto *groundswells* (ondas de longo período geradas por tempestades distantes) quanto *windswells* (ondas de curto período produzidas por ventos locais próximos à costa), sendo a direção de ondulação mais favorável proveniente do sudeste (Surf-Forecast, 2025). O litoral é marcado por fortes correntes que fluem tipicamente de noroeste para sudeste e é também o local mais próximo da Baía de Inhambane e do sistema de estuário (Kelchner *et al.*, 2021). A maré astronômica é do tipo semidiurno: duas preia-mares (PM) e duas baixa-mares (BM) por dia, com amplitudes de aproximadamente 3 m (Hoguane, 2007). As correntes superficiais (drifters) apresentam velocidades médias de 0,3–0,5 m/s, podendo ser mais fortes quando associadas a forçantes externas (marés, vento, ondas e eddies do Canal de Moçambique) (Christensen *et al.*, 2014).

A geologia e geomorfologia da província de Inhambane refletem a evolução da Bacia do Moçambique desde o Cretácico, marcada por depósitos continentais, marinhos e transicionais, sobrepostos por espessos pacotes quaternários de origem fluvial e eólica (Dumouchel; Hees; Alvin, 2016). A geologia da praia é dominada por depósitos sedimentares do Quaternário, característica comum ao sul de Moçambique e a grande parte do litoral (Muchangos, 1999). A geomorfologia atual é dominada por um campo multigeracional de paleodunas e dunas ativas, planícies aluviais e zonas lagunares, que resultam da interação entre variações do nível do mar, processos fluviais, ventos predominantes e correntes costeiras (Dumouchel; Hees; Alvin, 2016). A região possui um perfil suavemente inclinado, com fundo que desce até cerca de 30 m a 3 km da costa, seguido por uma descida acentuada até 60 m (Christensen *et al.*, 2014). Além disso, afloramentos de *beachrock* na zona entremarés desempenham papel relevante na dinâmica costeira, reduzindo a energia das ondas, retendo sedimentos transportados predominantemente para norte pelas correntes litorâneas e exercendo controle morfológico sobre a configuração da linha de costa (Matias, 2020).

3. Materiais e Métodos

Nesta pesquisa, utilizamos imagens do satélite Landsat 5, 7 e 8 de reflectância de superfície corrigidas atmosféricamente. A partir de imagens de satélites Landsat, foram extraídas linhas de costas correspondente a 24 anos, permitindo a análise de mudanças ao longo de várias décadas, de 2000 a 2024. As imagens foram filtrada por data (de 01 de Janeiro a 31 de Dezembro) e cobertura de nuvem (menos de 10%), para cada ano de análise. Isso é particularmente útil para avaliar tendências de erosão, deposição e alterações induzidas por atividades humanas ou mudanças climáticas. O histórico da linha de costa, recuperado a partir de imagens de satélite de satélites

Landsat 5, 7 e 8, possibilita a detecção precisa e o monitoramento contínuo das variações costeiras, como ilustrado em várias pesquisas (Almonacid-Caballer *et al.*, 2016; Ferreira, 2019; Bishop-Taylor; Nanson; Sagar; Lymburner, 2021; Quang *et al.*, 2021).

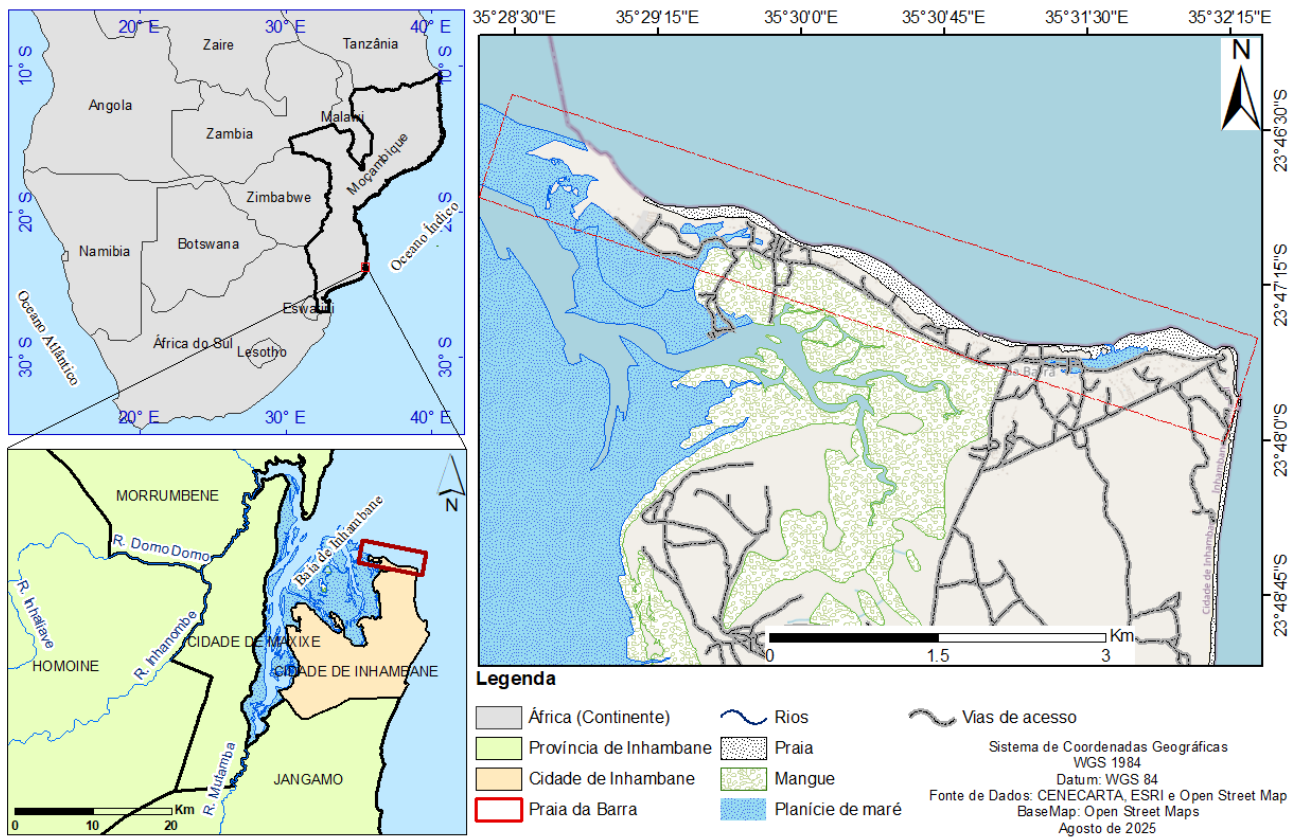


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

3.1. Composição de imagens satélites

Dados precisos e contínuos de levantamentos de campo são necessários para a compreensão da evolução, facto que é limitado devido a restrições de recursos e mão de obra em várias praias (Hu; Fan; Zhang, 2024). Para abordar a falta de dados de campo, algumas pesquisas utilizaram imagens de satélite de longo prazo, contínuas, como Landsat e Sentinel, para estudar a evolução de longo prazo das praias (Pardo-Pascual *et al.*, 2018; Bishop-Taylor; Nanson; Sagar; Lymburner, 2021). O fluxo metodológico desta pesquisa foi comprovado por meio de medições de campo como eficiente (Vos *et al.*, 2019)..

A plataforma do Google Earth Engine (GEE) fornece uma variedade de conjuntos de dados de satélite disponíveis publicamente e constantemente atualizados (Gorelick *et al.*, 2017). Todas as imagens de satélite nesta pesquisa foram facilmente integradas no GEE. O uso desta plataforma tem se destacado no monitoramento de linha de costa por permitir empregar a composição de imagens para reduzir erros induzidos por variabilidades temporais, como marés, cobertura de nuvens e distorções atmosféricas (Vos *et al.*, 2019). Nesta pesquisa, empregamos a composição de imagens de um ano com o filtro de mediana (Figura 2). O Global Shoreline Vector (GSV), um produto que consiste em dados globais de linha da costa derivadas de satélites do Serviço Geológico dos EUA utiliza imagens compostas medianas anuais e produz posições costeiras entre a linha de maré alta e a linha de maré baixa (Sayre *et al.*, 2019). O filtro de mediana é um método estatístico que substitui cada pixel da imagem pela mediana dos valores dos pixels em sua vizinhança (Gorelick *et al.*, 2017). Este método permitiu que a partir de uma série temporal de um ano, criar-se uma única imagem representativa para reduzir ruídos causados por variabilidades temporais.

3.2. Extração de Linha Costeira

O Índice modificado de água por diferença normalizada (MNDWI) foi usado para detectar o limite molhado/seco da interface oceano e continente (Júnior; de Alencar Castro, 2024). Esse índice funciona bem para delinear o limite terra e água (Vos *et al.*, 2019; Bishop-Taylor; Nanson; Sagar; Lymburner, 2021). O cálculo do MNDWI foi feito a partir da seguinte equação (Xu, 2006):

$$MNDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: Green corresponde a banda da luz verde; e NIR é a luz da banda infravermelha próxima.

A pesquisa de Günen e Atasever (2024), que avaliou a eficácia de vários índices hídricos (WRI, NWI, MNDWI, NDWI) verificou que o MNDWI se destacou consistentemente como um índice robusto para extração de água. Comparado o MNDWI aos outros índices, os resultados de Hastuti; Ismail e Nagai (2024) indicam que o MNDWI é o índice mais eficaz para extrair linha costa.

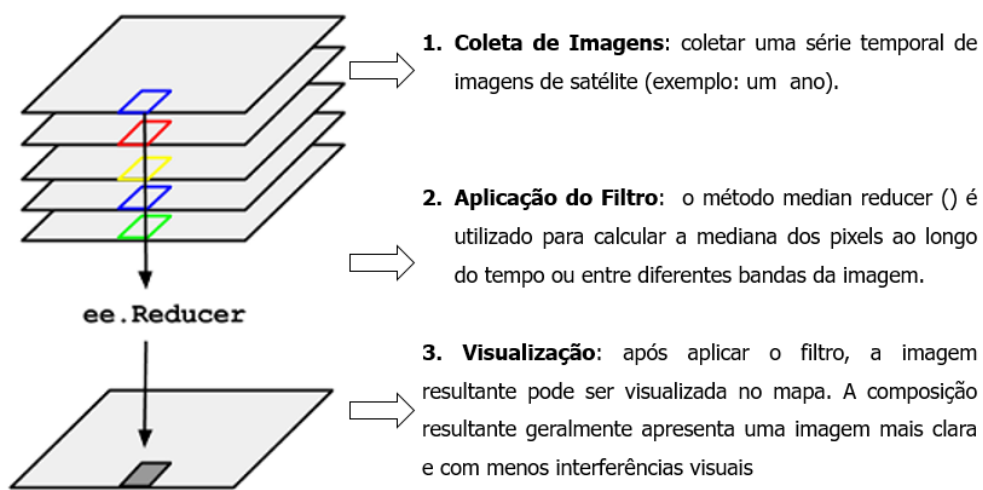


Figura 2. Princípio do filtro de mediana no Google Earth Engine.

A combinação do MNDWI com o método Otsu oferece uma abordagem automática para a extração da linha de costa, onde as imagens são processadas para identificar a interface entre o mar e a terra (Donchyts *et al.*, 2016). Esta combinação resulta em um histograma da função de densidade de probabilidade da imagem binária (água e terra) (Vos *et al.*, 2019). Aplicamos o Otsu Dynamic Thresholding proposto por Donchyts *et al.* (2016), que desenvolveu uma abordagem para derivar uma máscara de água da superfície a partir de imagens de satélite. O método Otsu permite a detecção totalmente automática das linhas de costa em um curto espaço de tempo, como demonstrado por Spinosa *et al.* (2021).

3.3. Operação Morfológica

Donchyts *et al.*, (2016) aplicaram o método de morfologia matemática para transformação de acerto ou erro a uma imagem de máscara de água binária. Neste método, pixels potenciais de água e terra localizados perto da água são então computados usando dilatação e erosão morfológica aplicada às bordas detectadas. De acordo com Spinosa *et al.*, (2021), as operações morfológicas são amplamente usadas no processamento de imagens, pois esclarecem a imagem eliminando irrelevantâncias e preservando a forma dos objetos. Linhas costeiras extraídas podem ser descontínuas, especialmente em áreas de marés ou onde a qualidade da imagem é baixa. A dilatação combina dois vetores usando adição, enquanto a erosão usa subtração. Neste estudo aplicamos as operações morfológicas de dilatação.

3.4. Detecção de alterações na linha de costa

A detecção e análise das alterações na linha de costa ao longo dos 24 anos de estudo foi realizada utilizando a ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Trata-se de uma extensão do software ArcGIS, desenvolvida pelo U.S. Geological Survey (USGS), que permite calcular taxas de mudança da linha de costa com base em séries temporais de dados geoespaciais (Himmelstoss *et al.*, 2024). O DSAS gera automaticamente linhas perpendiculares à linha de costa (transectos) a partir de uma linha base definida pelo usuário. Essas linhas são usadas para medir as mudanças espaciais na posição da linha de costa. No DSAS, a Taxa de Ponto Final (EPR) calcula a variação da linha de costa utilizando apenas duas datas, enquanto a Taxa de Regressão Linear (LRR) ajusta uma regressão linear considerando múltiplos anos, oferecendo uma estimativa mais estável. A Taxa de Regressão Linear Ponderada (WLR) aprimora a LRR ao atribuir pesos aos pontos com base na sua precisão, tornando a análise mais confiável. Esses métodos foram aplicados nesta pesquisa pois são eficientes para estudo de dinâmica costeira, como demonstrado em algumas pesquisas (Ferreira, 2019; Estevam; Osako; Francisco, 2021; Quang *et al.*, 2021). Nesta pesquisa, foram traçados 81 transectos perpendicular à costa, com uma configuração de espaçamento de 100 metros entre os transectos e uma distância de suavização de 2000 metros. A confiabilidade dos modelos de regressão linear simples (LRR) e regressão linear ponderada (WLR) foi avaliada a partir das métricas coeficiente de determinação (R^2), erro padrão e intervalo de confiança (95%).

4. Resultados

A linha de costa média temporal representa uma posição média da linha de costa ao longo de um ano (figura 3). Essa média é derivada da análise de múltiplas imagens adquiridas em diferentes condições temporais. Nesta pesquisa, ponderamos usar a mediana, que é a posição central dos dados, dividido em duas partes iguais. Esta função é útil em cenários onde há valores extremos ou distribuições assimétricas, como nas variações da linha de costa influenciadas por marés altas, tempestades ou períodos de calmaria.

4.1. Incertezas na posição da linha de costa

A Figura 3 mostra a distribuição das taxas de mudança da linha de costa para os métodos: EPR (cinza), LRR (escuro) e WLR (branco). As cores representam cada método, e a linha pontilhada preta indica a taxa de mudança zero, que separa as áreas de erosão (valores negativos) e deposição (valores positivos). A maioria dos valores está concentrada no lado negativo, indicando uma predominância da erosão. Na Figura 3, observa-se que os resultados do método Weighted Linear Regression (WLR) coincidem com os do Linear Regression Rate (LRR). Em grande parte dos transectos, o coeficiente de determinação (R^2) apresentou valores idênticos para ambos os modelos, o que significa que eles explicam a mesma proporção da variabilidade dos dados. Da mesma forma, o intervalo de confiança de 95% (IC95) também foi equivalente, ou seja, existe 95% de probabilidade de que a taxa real de mudança da linha de costa esteja contida no intervalo estimado. A principal diferença entre os modelos está associada ao erro padrão. No caso do WLR, utiliza-se o Weighted Standard Error (WSE), que representa o erro padrão ponderado, atribuindo maior peso às observações mais representativas da tendência temporal. Como o WSE foi menor no WLR do que no LRR, considera-se que o modelo ponderado fornece estimativas mais confiáveis das taxas de variação da linha de costa, reduzindo o efeito de possíveis valores atípicos.

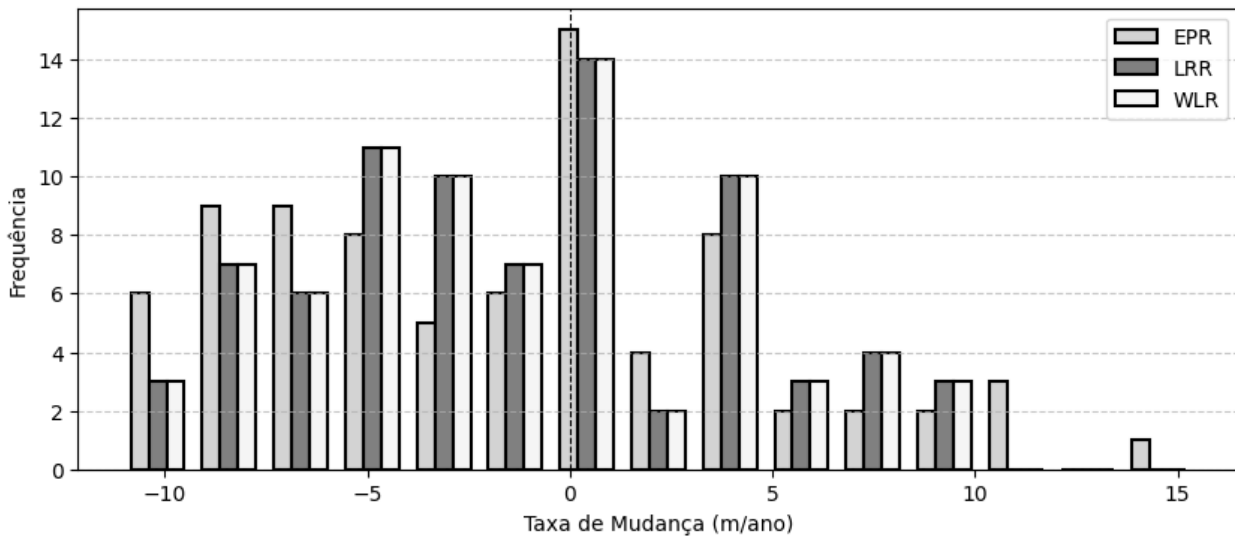


Figura 3. Distribuição das Taxas de Mudança da Linha de Costa na praia da Barra.

A partir dos dados de WR2 (R^2 do modelo de regressão linear ponderada) e WCI95 (intervalo de confiança de 95% do modelo ponderado) foi determinada a acurácia de cada tansecto gerado pelo modelo (Figura 4). Dos 82 transectos analisados, 20 apresentam alta confiabilidade ($WR2 \geq 0,7$), 41 possuem média confiabilidade ($0,3 \leq WR2 < 0,7$) e apenas 15 transectos (3, 13, 14, 15, 16, 29, 30, 63, 64, 65, 66, 67, 69, 71, 72), são classificados como baixa confiabilidade ($WR2 < 0,3$). Isso implica que a maioria dos transectos possui um nível moderado de precisão na regressão linear ponderada.

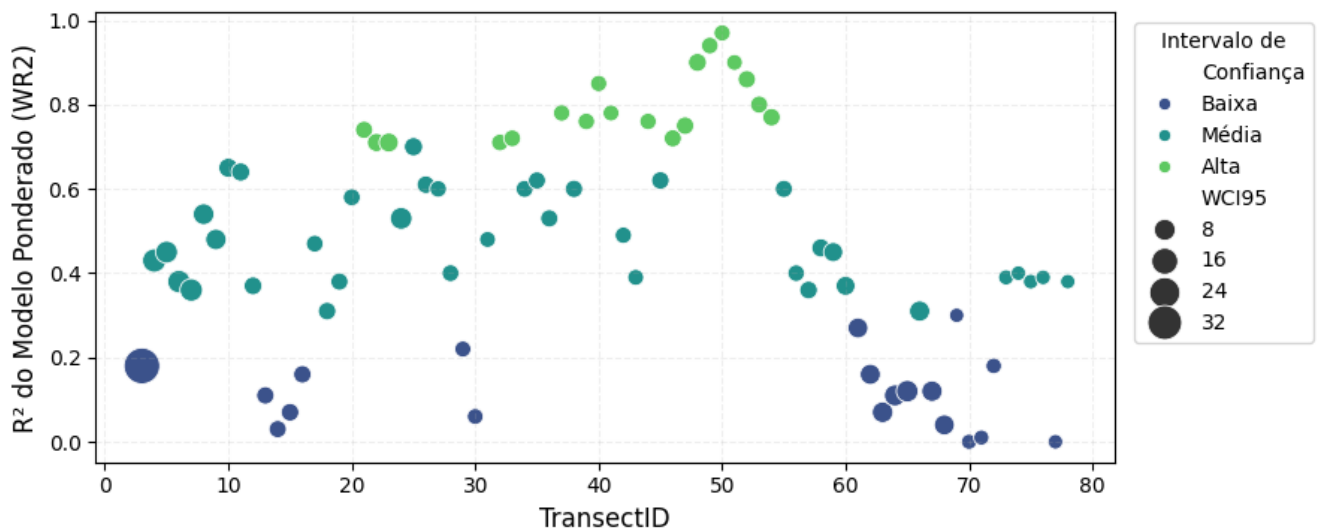


Figura 4. Confiabilidade do modelo de Regressão Linear Ponderada (WR2 e WCI95) por transecto.

4.2. Mudanças na linha costeira

A maior deposição ocorreu no transecto 4 (T4) em todos os métodos. O método EPR sugere uma erosão mais intensa porque apenas considera a primeira e última data (-1.54 m/ano), enquanto os métodos LRR e WLR fornecem estimativas mais estáveis porque analisam todas as datas disponíveis (-1.24 m/ano), sendo o transecto 23 o mais erosivo no método EPR, e transecto 52 (T52) é o mais erosivo no LRR (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação das Taxas de Mudança da Linha de Costa

Método	Média (m/ano)	Máx. Erosão (m/ano)	Máx. Deposição (m/ano)	% Erosão	% Deposição
EPR (End Point Rate)	-1.54	-11.06 (T23)	15.43 (T4)	67.9%	32.1%
LRR (Linear Regression Rate)	-1.24	-11.02 (T52)	8.78 (T4)	65.43%	34.57%
WLR (Weighted Linear Regression)	-1.24	-11.02 (T52)	8.78 (T4)	65.43%	34.57%

Na *Figura 5*, os valores de WLR representam a taxa de mudança da linha de costa (m/ano) ao longo do tempo em cada transecto analisado. Os valores negativos ($-11,1 < WLR \leq -3,0$) correspondem a áreas com erosão severa, sendo $-11,1$ m/ano a taxa mais intensa registrada. Em contraste, os valores positivos ($3,0 < WLR \leq 8,8$) refletem processos de deposição, evidenciando o avanço da linha de costa em determinados setores. No gráfico de barras (*Figura 5*), essa dinâmica é representada visualmente pelas cores: barras vermelhas indicam erosão (valores negativos), enquanto barras azuis representam acreção (valores positivos).

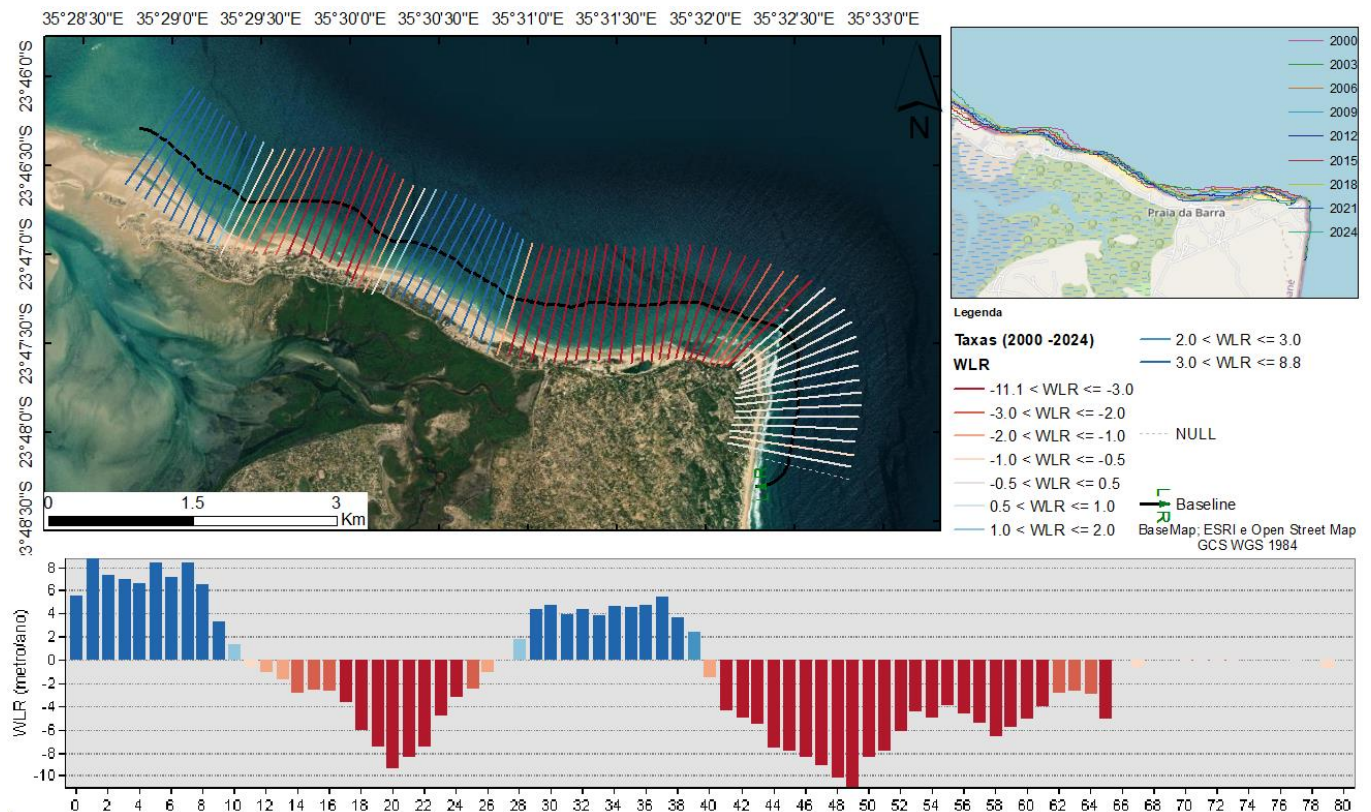


Figura 5. Taxa de regressão linear ponderada (WLR) para cada transecto analisado na praia da Barra.

Os transectos 52 a 55 (Latitude -23.7825 a -23.7827 , Longitude 35.5249 a 35.5276) apresentam as maiores magnitudes dos valores negativos de WLR, com taxas variando de $-11,02$ m/ano a $-6,21$ m/ano (*Figura 5*). Esses valores indicam que essas áreas estão recuando rapidamente devido a processos de erosão intensificados. Entretanto, os transectos no início da análise, como 3 a 11 (Latitude -23.7676 a -23.7717 , Longitude 35.4852 a 35.4902), mostram valores positivos de WLR ($3,31$ m/ano a $8,78$ m/ano), indicando avanço da linha de costa devido à deposição sedimentar.

5. Discussão

A análise estatística da dinâmica costeira na Praia da Barra evidencia um claro predomínio da erosão, com uma taxa média de $-2,72$ m/ano. Importa destacar que a taxa média de recuo observada supera significativamente a média global de aproximadamente $-0,5$ m/ano reportada por Luijendijk *et al.* (2018), posicionando a Praia da Barra entre as áreas mais vulneráveis à erosão costeira em escala internacional. Em contraste, a progradação da linha de costa ocorre em 34,6% dos transectos (28 transectos), com taxa média de avanço de $1,48$ m/ano. Esses resultados indicam menor magnitude e menor variabilidade associada aos processos deposicionais quando comparados com a erosão, o que reforça o caráter assimétrico da dinâmica costeira local, onde a tendência erosiva predomina sobre a deposicional.

Um aspecto relevante é a coincidência entre os maiores valores de erosão e a presença de infraestruturas turísticas. Esse padrão sugere que a remoção ou ausência de vegetação natural, especialmente dunas fixadas por vegetação nativa, compromete a resiliência da linha de costa, reduzindo sua capacidade de amortecimento frente à ação das ondas, marés e ventos (**Figura 6**). Azevedo *et al.* (2013) observaram que, na Praia da Barra, existem unidades de alojamento turístico implantadas nas dunas primárias, locais onde ciclicamente ocorre a desova de tartarugas marinhas e onde habitam diferentes espécies florísticas e faunísticas. Segundo Palalane *et al.*, (2016), as construções em áreas proibidas na praia da Barra, como sobre dunas primárias, impedem a recuperação natural da praia e aumentam a vulnerabilidade da costa à erosão. Portanto, a predominância da erosão sugere a necessidade de intervenções estratégicas para mitigar os impactos e proteger as áreas mais vulneráveis.

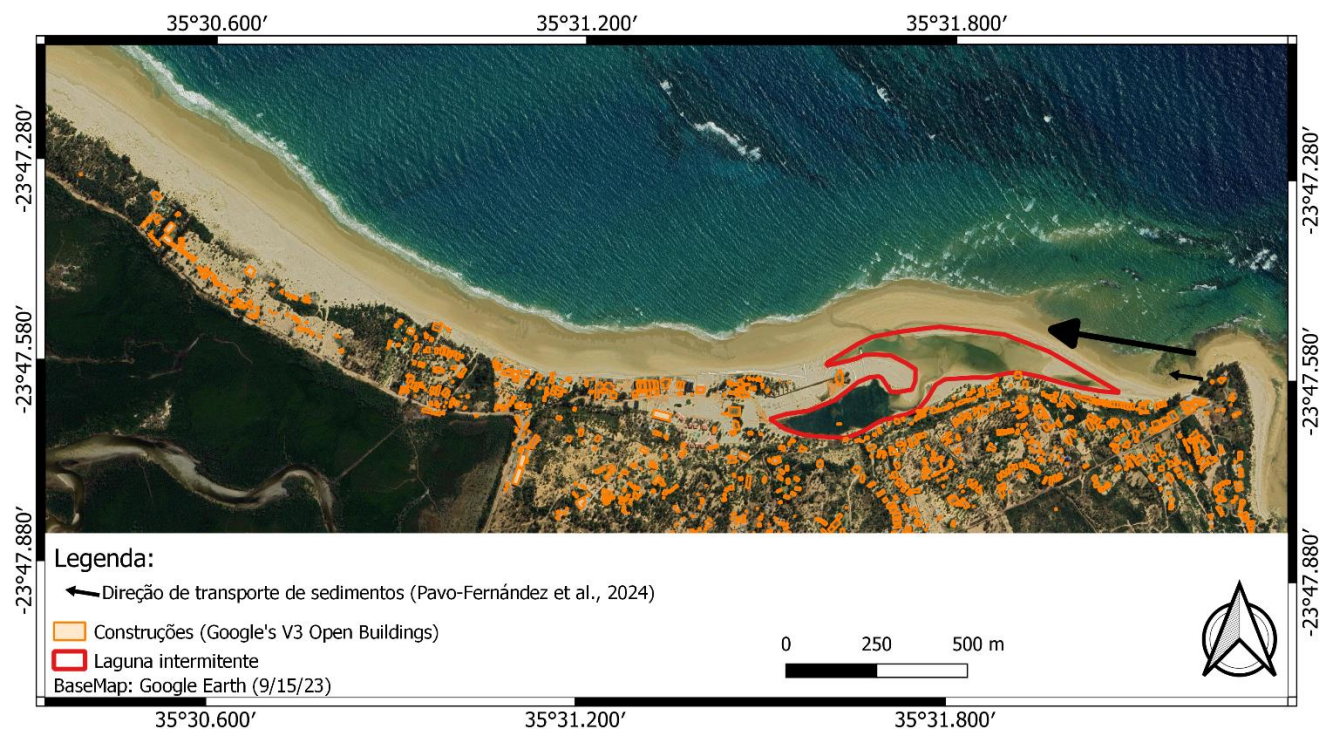


Figura 6. Vista aérea da praia da Barra mostrando corpos lagunares temporários e bancos arenosos móveis, formados pelo transporte litorâneo na direção indicada pela seta.

Os resultados da Weighted Linear Regression Rate (WLR) reforçam as observações de Azevedo (2009), indicando que a expansão turística na Praia da Barra, sobretudo pela construção de instalações em dunas sem cobertura vegetal costeira, exerce um papel significativo na intensificação da erosão. A análise mostra que os transectos com as maiores taxas negativas de WLR concentram-se em áreas de forte intervenção humana, ausência de vegetação nativa e presença de infraestrutura turística. Esse padrão evidencia que a supressão da vegetação compromete a estabilidade natural das dunas, reduzindo sua função de barreira contra agentes hidrodinâmicos e favorecendo o avanço do processo erosivo. Apesar da influência antrópica, o comportamento morfológico geral da praia é marcado por uma justaposição de setores erosivos e deposicionais, refletindo um padrão de elevada complexidade espacial. Essa alternância já foi documentada em outras costas de alta energia, como na costa do Kuwait (Aladwani, 2022) e na Península de Yucatán (Torres-Freyermuth *et al.*, 2023). Os resultados obtidos na Praia

da Barra são também consistentes com o conceito de auto-organização da linha de costa (Coco; Murray, 2007), em que a interação dinâmica entre ondas e transporte sedimentar gera padrões alternados de recuo e avanço da linha de costa. Especificamente, verificou-se que a sedimentação é mais expressiva no setor noroeste, o que pode ser explicado pela proximidade com a Baía de Inhambane, que atua como fonte de sedimentos. Além disso, o transporte litorâneo dirigido para o norte, favorecido pela predominância de ventos de sudeste (Massuanganhe; Arnberg, 2008), condiciona a redistribuição sedimentar ao longo das praias da região.

Outro ponto crucial identificado neste estudo é a importância da vegetação costeira na estabilização das dunas e na proteção contra os impactos de ondas e ventos. A redução ou ausência de gramíneas e arbustos na Praia da Barra aumenta a vulnerabilidade das dunas à erosão. Vilanculo (2019) já havia relatado mobilidade significativa de areia na região, associada à escassez de vegetação e à ocorrência de ventos com velocidades superiores a 6 m/s, capazes de transportar sedimentos e intensificar a erosão eólica. Os resultados também destacam o papel dos processos hidrodinâmicos locais como a refração das ondas, visível pela curvatura das cristas à medida que se aproximam da costa. Essas evidências são reforçadas pelas estatísticas de vento e surfe, do modelo NWW3 disponibilizadas pelo Surf-Forecast (2025), que demonstra a predominância de ondulações oriundas de SSE, com cerca de 34% do tempo apresentando ventos offshore e 11% ventos suficientemente fracos para deixar o mar transparente. Do ponto de vista da dinâmica costeira, tal predominância direcional favorece a concentração da energia das ondas em determinados setores da praia, o que pode acentuar processos erosivos já identificados por Azevedo; Frei e Marques (2013). As correntes longitudinais originadas por ventos de SSE e ventos offshore, foram apontados como os principais agentes responsáveis pela evolução da restinga de Pomene em Inhambane (Massuanganhe; Arnberg, 2008). Essas observações são corroboradas por Pavo-Fernández; Gracia; Grifoll e Solana (2024), que descrevem a Praia da Barra como um sistema costeiro altamente energético, caracterizado por intenso transporte litorâneo e elevado risco associado às ações de ondas e correntes. A movimentação sedimentar indica um padrão de transporte paralelo à linha de costa, enquanto a incidência das ondas, frequentemente perpendicular à praia, contribui para a alternância entre setores de erosão e deposição. Esse comportamento é coerente com a teoria de Coco e Murray (2007), segundo a qual a morfodinâmica costeira resulta da retroalimentação contínua entre hidrodinâmica e transporte de sedimentos, alterando a configuração da linha de costa ao longo do tempo.

6. Conclusões

Este estudo analisou a dinâmica da linha de costa na Praia da Barra, província de Inhambane, ao longo de 24 anos, integrando imagens históricas Landsat, a plataforma Google Earth Engine e a ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Os resultados revelaram que a erosão predomina em 65,4% dos transectos analisados, com uma taxa média de recuo de -2,72 m/ano, valor superior à média global. Em contraste, a deposição foi observada em apenas 34,6% dos transectos, com valores positivos que atingem até +8,8 m/ano, sobretudo no setor norte da praia, influenciado pelo aporte sedimentar da Baía de Inhambane e pelo transporte longitudinal. As áreas com os maiores valores negativos da regressão linear ponderada (WLR) devem ser priorizadas em futuras ações de proteção e mitigação. Para além de contribuir para o entendimento da dinâmica costeira local, este estudo demonstra a eficácia da integração de imagens Landsat, Google Earth Engine e DSAS como uma alternativa de baixo custo e elevada precisão para o monitoramento de longo prazo da linha de costa em Moçambique. Diante desse cenário, torna-se urgente a implementação de medidas de gestão costeira sustentável na Praia da Barra, sobretudo nos trechos mais pressionados pela atividade turística. Estratégias como o restabelecimento da vegetação nativa, a preservação das dunas e a criação de barreiras naturais podem contribuir para a contenção da erosão, a restauração dos ecossistemas costeiros e a melhoria da resiliência ambiental da região e do país em geral.

Contribuições dos Autores: Oldim Vilanculo: concepção, metodologia, análise formal, preparação do manuscrito. Hélder Machaieie: concepção, análise formal, revisão e edição do manuscrito. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Este estudo foi autofinanciado pelos autores. Nenhum apoio financeiro foi recebido de qualquer organização ou instituição em relação a este estudo.

Agradecimentos: Agradecemos aos dois revisores anônimos pelas observações e sugestões construtivas, que melhoraram significativamente a qualidade do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALADWANI, N. S. Shoreline change rate dynamics analysis and prediction of future positions using satellite imagery for the southern coast of Kuwait: A case study. **Oceanologia**, 64, n. 3, p. 417-432, 2022.
2. ALMONACID-CABALLER, J.; SÁNCHEZ-GARCÍA, E.; PARDO-PASCUAL, J. E.; BALAGUER-BESER, A. A. *et al.* Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. **Marine Geology**, 372, p. 79-88, 2016.
3. AZEVEDO, H. A.; FREI, V. V. M.; MARQUES, A. C. D. O. Impactos e riscos ambientais da atividade turística: a Praia da Barra no Município de Inhambane/ Moçambique. vol. 15 n^o2jul/dez, 2013, p. páginas: 1 –27, 2013/06 2013.
4. AZEVEDO, H. A. M. A. **Modelo de diagnóstico ambiental para elaboração do plano ambiental do município de Inhambane em Moçambique**. 2009. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Católica de Brasília, Brasília.
5. BISHOP-TAYLOR, R.; NANSON, R.; SAGAR, S.; LYMBURNER, L. Mapping Australia's dynamic coastline at mean sea level using three decades of Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, 267, p. 112734, 2021.
6. CABRAL, P.; AUGUSTO, G.; AKANDE, A.; COSTA, A. *et al.* Assessing Mozambique's exposure to coastal climate hazards and erosion. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 23, p. 45-52, 2017/08 2017.
7. CHRISTENSEN, K. H.; GAMMELSRØD, T.; HOGUANE, A.; TASKJELLE, T. *et al.* **A first assessment of nearshore waves and currents in Tofo, Inhambane**. Ministry for the Coordination of Environmental Affairs (MICOA), Mozambique. 2014.
8. CHRISTOFI, D.; METAS, C.; EVAGOROU, E.; STYLIANOU, N. *et al.* A Review of Open Remote Sensing Data with GIS, AI, and UAV Support for Shoreline Detection and Coastal Erosion Monitoring. **Appl. á Sci. á**, 15, p. 4771, 2025.
9. COCO, G.; MURRAY, A. B. Patterns in the sand: From forcing templates to self-organization. **Geomorphology**, 91, n. 3-4, p. 271-290, 2007.
10. CROWELL, M.; LEATHERMAN, S. P.; BUCKLEY, M. K. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. **Journal of coastal research**, p. 839-852, 1991.
11. DONCHYTS, G.; SCHELLEKENS, J.; WINSEMIUS, H.; EISEMANN, E. *et al.* A 30 m Resolution Surface Water Mask Including Estimation of Positional and Thematic Differences Using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A Case Study in the Murray-Darling Basin, Australia. **Remote Sensing**, 8, n. 5, p. 386, 2016/05/06 2016.
12. DUMOUCHEL, J.; HEES, F.; ALVIN, M. Coastal evolution and associated titanium sand mineralisation of Jangamo district, Inhambane Province, Mozambique. **Applied Earth Science**, 125, n. 3, p. 140-152, 2016.
13. ESTEVAM, C. N.; OSAKO, L. S.; FRANCISCO, J. A. A. Análise multitemporal da variação da linha de costa no setor centro-sul da Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, 21, n. 4, p. 73-90, 2021/12/14 2021.
14. FAN, D.; XU, J.; WU, Y.; LEE, G. H. Coastal environmental changes under increasing anthropogenic impacts: an introduction. **Anthropocene Coasts**, 2, n. 1, p. v-xii, 2019.
15. FERNANDO, M. **Políticas do turismo e a sustentabilidade sócioambiental em Moçambique: a experiência das áreas prioritárias para o investimento turístico e seus impactos no município de Inhambane**. 2013. 185 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Estadual da Paraíba.
16. FERREIRA, T. A. B. **Aplicação de sistema de análise de linha de costa (Digital Shoreline Analysis System) para avaliação de mudanças costeiras no delta do Parnaíba**. 2019. (Dissertação de Mestrado) -, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Brasil. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/28519>.
17. FORDYCE, A. J. Reef fishes of praia do Tofo and praia da Barra, Inhambane, Mozambique. **Western Indian Ocean Journal of Marine Science**, 17, n. 1, p. 71-91, 2018.
18. GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, 202, p. 18-27, 2017/12 2017.
20. GÜNEN, M. A.; ATASEVER, U. H. Remote sensing and monitoring of water resources: A comparative study of different indices and thresholding methods. **Science of the Total Environment**, 926, p. 172117, 2024.

21. HASTUTI, A. W.; ISMAIL, N. P.; NAGAI, M., 2024, **Analysis of coastline extraction indices using Sentinel-2 and Google Earth Engine, case study in Bali, Indonesia**. EDP Sciences. 04004.
22. HIMMELSTOSS, E. A.; HENDERSON, R. E.; FARRIS, A. S.; KRATZMANN, M. G. *et al.* **Digital Shoreline Analysis System version 6.0: U.S. Geological Survey software release**. 2024.
23. HOGUANE, A. M. Perfil diagnóstico da zona costeira de Moçambique. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, 7, n. 1, p. 69-82, 2007.
24. HU, R.; FAN, Y.; ZHANG, X. Satellite-Derived Shoreline Changes of an Urban Beach and Their Relationship to Coastal Engineering. **Remote Sensing**, 16, n. 13, 2024.
25. IPCC. Summary for Policymakers. *In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE, C. (Ed.). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 3-32.
26. JÚNIOR, W. C. G.; DE ALENCAR CASTRO, J. W. Variações Morfológicas e Erosão das Praias do Segmento Central do Estado do Rio de Janeiro: Técnicas de Sensoriamento Remoto e Padrões Granulométricos. **Geosciences= Geociências**, 43, n. 4, p. 633-644, 2024.
27. KELCHNER, H.; REEVE-ARNOLD, K. E.; SCHREINER, K. M.; BARGU, S. *et al.* Domoic Acid and Pseudo-nitzschia spp. Connected to Coastal Upwelling along Coastal Inhambane Province, Mozambique: A New Area of Concern. **Toxins**, 13, n. 12, p. 903, 2021.
28. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F. *et al.* The state of the world's beaches. **Scientific reports**, 8, n. 1, p. 6641, 2018.
29. MASSUANGANHE, E.; ARNBERG, W. Monitoring spit development in Pomene, southern Mozambique, using Landsat data. **WIT Transactions on The Built Environment**, 100, p. 119-127, 2008.
30. MATIAS, R. V. D. **Anthracological Analysis of Late Iron Age Shell-Middens Complex at Praia do Tofo and Praia da Rocha, Inhambane, Mozambique**. 2020. -, Universidade do Algarve (Portugal).
31. MUCHANGOS, A. D. Moçambique paisagens e regiões naturais. Maputo: 163 p p. 1999.
32. NGUYEN, H.-H.; MCALPINE, C.; PULLAR, D.; LEISZ, S. J. *et al.* Drivers of coastal shoreline change: case study of Hon Dat coast, Kien Giang, Vietnam. **Environmental management**, 55, n. 5, p. 1093-1108, 2015.
33. OKEMWA, E. The Implications of Climate Change and Sea Level Rise in the East African Coastal Region: a Study of Kenya. *In: BORDOMER 92: International Convention on Rational Use of Coastal Zones; a preparatory meeting for the organization of an International Conference on Coastal Change, 1992, Bordeaux, France*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1834/7799>.
34. OPPENHEIMER, M.; GLAVOVIC, B. C.; HINKEL, J.; VAN DE WAL, R. *et al.* Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. *In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE, C. (Ed.). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 321-446.
35. PAJAK, K.; IDZIKOWSKA, M.; KOWALCZYK, K. Sea Level Variability Assessment along the African Coast. **Sustainability**, 16, n. 13, p. 5661, 2024/07/02 2024.
36. PALALANE, J.; LARSON, M.; HANSON, H.; JUÍZO, D. Coastal erosion in Mozambique: Governing processes and remedial measures. **Journal of Coastal Research**, 32, n. 3, p. 700-718, 2016.
37. PARDO-PASCUAL, J. E.; SÁNCHEZ-GARCÍA, E.; ALMONACID-CABALLER, J.; PALOMAR-VÁZQUEZ, J. M. *et al.* Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. **Remote Sensing**, 10, n. 2, p. 326, 2018.
38. PAVO-FERNÁNDEZ, E.; GRACIA, V.; GRIFOLL, M.; SOLANA, G. Longshore Sediment Transport Patterns In Mozambique: A Tool For Coastal Planning. : Copernicus GmbH 2024.

39. PRASAD, D. H.; KUMAR, N. D. Coastal Erosion Studies—A Review. **International Journal of Geosciences**, 05, n. 03, p. 341-345, 2014.
40. QUANG, D. N.; NGAN, V. H.; TAM, H. S.; VIET, N. T. *et al.* Long-Term Shoreline Evolution Using DSAS Technique: A Case Study of Quang Nam Province, Vietnam. **Journal of Marine Science and Engineering**, 9, n. 10, p. 1124, 2021/10/14 2021.
41. SAYRE, R.; NOBLE, S.; HAMANN, S.; SMITH, R. *et al.* A new 30 meter resolution global shoreline vector and associated global islands database for the development of standardized ecological coastal units. **Journal of Operational Oceanography**, 12, n. sup2, p. S47-S56, 2019.
42. SPINOSA, A.; ZIEMBA, A.; SAPONIERI, A.; DAMIANI, L. *et al.* Remote Sensing-Based Automatic Detection of Shoreline Position: A Case Study in Apulia Region. **Journal of Marine Science and Engineering**, 9, n. 6, p. 575, 2021/05/26 2021.
43. SURF-FORECAST. **Barra Beach Surf Stats**. 2025. Disponível em: <https://pt.surf-forecast.com/breaks/Barra-Beach/surf-stats>. Acesso em: 09 de Agosto de 2025.
44. TORRES-FREYERMUTH, A.; LÓPEZ-RAMADE, E.; MEDELLÍN, G.; ARRIAGA, J. A. *et al.* Assessing shoreline dynamics over multiple scales on the northern Yucatan Peninsula. **Regional Studies in Marine Science**, 68, p. 103247, 2023.
45. VILANCULO, G. D. J. D. **Estudo da Dinâmica Eólica Sedimentar das Dunas Costeiras na Praia de Barra, Cidade de Inhambane**. 2019. (Tese de Licenciatura) -, Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane, Moçambique.
46. VOS, K.; SPLINTER, K. D.; HARLEY, M. D.; SIMMONS, J. A. *et al.* CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. **Environmental Modelling & Software**, 122, p. 104528, 2019.
47. VOUSDOUKAS, M. I.; RANASINGHE, R.; MENTASCHI, L.; PLOMARITIS, T. A. *et al.* Sandy coastlines under threat of erosion. **Nature climate change**, 10, n. 3, p. 260-263, 2020.
48. XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006/07/20 2006.
49. ZACARIAS, D. A. **Vulnerabilidade comunitária às mudanças climáticas no município de Inhambane**. Centro de Desenvolvimento Sustentável para as Zonas Costeiras. Gaza, Moçambique. 2013.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.